

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Estudio comparativo de un autobús
mediante simulación: propulsión
eléctrica frente a gas natural ”

Iván Arrazola Lordén

Tutor/es

Antonio Soria Verdugo

Leganés, 2018



[Incluir en el caso del interés en su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

RESUMEN

El presente proyecto consiste en analizar el desempeño de un autobús propulsado mediante energía eléctrica frente a otro autobús de características semejantes, pero empujado por un motor de combustión interna que utiliza gas natural como combustible.

Para poder comparar el funcionamiento de los dos autobuses de una manera general, vamos a analizar sus aptitudes mediante simulación en distintos escenarios. Además, este proyecto abarca distintas ramas del conocimiento que se ven reflejadas en los puntos de estudio en los que se centra el mismo, como son: la eficiencia energética, el impacto medioambiental, o los costes.

Este trabajo es un proyecto de análisis cuyo objetivo intenta responder a un problema actual y de transcendencia global. Aunque está particularizado para una localización concreta, la metodología utilizada puede ser aplicada de manera global.

Palabras clave: autobús solar, combustibles alternativos, perfiles de velocidad, simulación de vehículos

DEDICATORIA

Deseo expresar mi agradecimiento a mis compañeros y profesores de grado por ayudarme a adquirir los conocimientos que se verán plasmados en este trabajo, y en especial, a mis padres y hermana, sin los cuales no habría sido posible este trabajo, y a quienes me gustaría dedicárselo.

No querría terminar esta dedicatoria sin agradecer a la Universidad Carlos III, y en particular a mi tutor, por todos los recursos que han puesto a mi disposición para la realización de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

1. PRESENTACIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	7
1.4. Contexto histórico	7
2. DESARROLLO	13
2.1. Tecnologías involucradas	13
2.1.1. Autobús de GNC	14
2.1.2. Autobús eléctrico.	20
2.2. Caso de estudio.	24
2.2.1. Simulación del comportamiento	26
2.2.2. Estimación de costes.	39
2.3. Propuesta de mejora	40
2.3.1. Fundamentos de los paneles solares fotovoltaicos.	41
2.3.2. Tipos de celdas fotovoltaicas	42
2.3.3. Curvas características	43
2.3.4. Caso propuesto	44
2.3.5. Análisis de resultados	54
3. CONCLUSIÓN	58
BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Estructura de la demanda energética del sector transporte según fuentes energéticas, 2000-2015	2
1.2	Graph showing annual sales of light-duty plug-in electric vehicles in the world's top markets between 2011 and 2017.	2
1.3	Radiative forcing, relative to 1750, of all the long-lived greenhouse gases. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), which is indexed to 1 for the year 1990, is shown on the right axis	3
1.4	PM and NOx emission values under the OCTA cycle for diesel and CNG buses	6
1.5	Primer autobús de gasolina de la historia. Benz Omnibus 1895.	8
1.6	Primer autobús diésel de la historia. The Mack Bus 1900.	8
1.7	Línea I de autobuses. Plaza Pigalle, París en 1907.	9
1.8	Una TN6A de la línea 125, equipada con un gasificador, está esperando la hora de salida en Porte d'Orléans.	10
1.9	Mercedes-Benz O 6600 H de la oficina de correos Köln-Deutz en uso en la ruta Colonia - Gleuel alrededor de 1956/1957.	11
1.10	Pegaso 6035. Uno de los primeros autobuses articulados de la EMT en los años setenta.	11
1.11	Autobús de la EMT. Línea 87. Breda Menarinibus Vivacity + C CNG. . .	12
2.1	Type III and Type IV vessels from Hexagon Composites in a bus	15
2.2	Ciclo Otto ideal y real.	16
2.3	Desempeño del motor MB M 906 LAG.	17
2.4	The CNG Buses Roadmap: from Euro III to Euro VI	19
2.5	WEH® Boca de llenado de combustible TK26 CNG para autobuses y camiones (NGV2)	20
2.6	Curvas de par y potencia frente a revoluciones por minuto de un motor eléctrico.	23
2.7	Dispositivo de carga rápida para autobuses eléctricos mediante pantógrafo invertido conectado a uno.	24
2.8	Fuerzas principales que actúan sobre un vehículo en pendiente.	28

2.9	Ciclo Orange County Bus (OC BUS)	29
2.10	Ciclo Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) para vehículos pesados de la EPA	29
2.11	Ciclo New York City (NYCC) de la EPA	30
2.12	Parámetros del programa FastSim. Características del vehículo. Autobús GNC.	30
2.13	Parámetros del programa FastSim. Características del combustible y el motor. Autobús GNC.	31
2.14	Parámetros del programa FastSim. Características de las ruedas. Autobús GNC.	31
2.15	Parámetros del programa FastSim. Selección de ciclos e inicialización. . .	32
2.16	Parámetros del programa FastSim. Características del vehículo. Autobús eléctrico.	32
2.17	Parámetros del programa FastSim. Características del motor y de las baterías. Autobús eléctrico.	33
2.18	Resultados del programa FastSim. Ciclo UDDS para vehículos pesados. Autobús GNC.	33
2.19	Resultados del programa FastSim. Ciclo UDDS para vehículos pesados. Autobús eléctrico.	34
2.20	Resultados del programa FastSim. Ciclo OC BUS. Autobús GNC.	34
2.21	Resultados del programa FastSim. Ciclo OC BUS. Autobús eléctrico. . .	35
2.22	Resultados del programa FastSim. Ciclo NYCC. Autobús GNC.	35
2.23	Resultados del programa FastSim. Ciclo NYCC. Autobús eléctrico. . . .	35
2.24	Resultados generales del programa FastSim. Autobús GNC.	36
2.25	Resultados generales del programa FastSim. Autobús eléctrico.	36
2.26	Autobús eléctrico BYD con paneles solares fotovoltaicos en el techo. . . .	41
2.27	Estructura de silicio policristalino en una celda fotovoltaica.	42
2.28	Curva característica del módulo fotovoltaico IS-200/32 de Isofotón. . . .	43
2.29	Curva característica del módulo fotovoltaico IS-200/32 de Isofotón. Variando temperatura a irradiación constante.	44
2.30	Rendimiento de la celda en función de la temperatura de la misma. Regresión polinómica a partir de cinco puntos.	45
2.31	Temperatura ambiente horaria en Madrid durante un año natural.	46

2.32	Irradiación solar horaria sobre la superficie horizontal en Madrid durante un año natural.	47
2.33	Temperatura horaria de la celda fotovoltaica en Madrid durante un año natural.	47
2.34	Rendimiento del módulo fotovoltaico por hora en Madrid durante un año natural.	48
2.35	Potencia eléctrica obtenida por placa solar por hora en Madrid durante un año natural.	49
2.36	Temperatura ambiente el 16 de Julio en Madrid.	49
2.37	Temperatura ambiente el 8 de Febrero en Madrid.	50
2.38	Irradiación solar sobre la superficie horizontal el 16 de Julio en Madrid. .	50
2.39	Irradiación solar sobre la superficie horizontal el 8 de Febrero en Madrid.	51
2.40	Temperatura de la celda el 16 de Julio en Madrid.	51
2.41	Temperatura de la celda el 8 de Febrero en Madrid.	52
2.42	Rendimiento del módulo el 16 de Julio en Madrid.	52
2.43	Rendimiento del módulo el 8 de Febrero en Madrid.	53
2.44	Potencia eléctrica suministrada por el módulo el 16 de Julio en Madrid. .	53
2.45	Potencia eléctrica suministrada por el módulo el 8 de Febrero en Madrid.	54

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Emisiones asociadas de CO ₂ del transporte terrestre por tipo de combustible	5
1.2	Límites de emisiones en la normativa Euro VI para automóviles y vehículos ligeros	5
2.1	Características principales del BredaMenarinibus Vivacity+ C CNG . . .	25
2.2	Características principales de un autobús eléctrico homólogo	26
2.3	Consumos de los dos modelos de autobús en los diferentes ciclos de conducción	37
2.4	Autonomías de los dos modelos de autobús en los diferentes ciclos de conducción	38
2.5	Valores característicos del módulo fotovoltaico a distintas temperaturas .	45
2.6	Energía eléctrica suministrada a lo largo del día por el sistema fotovoltaico estudiado	55
2.7	Reducción de los consumos del autobús eléctrico en los diferentes ciclos con los paneles solares instalados	56

ACRÓNIMOS UTILIZADOS CON MÁS FRECUENCIA

AGGI - Índice anual de gases de efecto invernadero
CNG/GNC - Gas natural comprimido
CH₄ - Metano
CO - Monóxido de Carbono
CO₂ - Dióxido de carbono
EEUU - Estados Unidos de América
EGR - Recirculación de gases de escape
EMT - Empresa Municipal de Transportes de Madrid
GLP - Gas licuado del petróleo
GNC - Gas natural comprimido
HCs - Hidrocarburos
IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
KERS - Freno regenerativo
NOAA - Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
NO_x - Óxidos de nitrógeno
NO₂ - Dióxido de nitrógeno
OC - Catalizador de oxidación
O₃ - Ozono
PM₁₀ - Pequeñas partículas solidas de 10 μ m
PM_{2,5} - Pequeñas partículas solidas de 2,5 μ m
PN - Número de partículas
RAE - Real Academia Española de la lengua
rpm - Revoluciones por minuto
SOF - Fracción orgánica soluble
STCRP - Compañía de Transporte Público de París
TWC - Catalizador de tres vías
UE - Unión Europea
VAN - Valor Actual Neto
VOCs - Compuestos orgánicos volátiles

1. PRESENTACIÓN

1.1. Introducción

Para poder entrar de lleno en la parte sustancial de este trabajo, que es el cálculo del desempeño de dos modelos de autobús en distintos ciclos de conducción, voy a explicar varios conceptos necesarios, tales como, el motivo de hacer este trabajo, los objetivos que pretende obtener, las tecnologías que se aplicarán en su realización o la contextualización del proyecto para poder ubicarlo, y posteriormente sacar las conclusiones adecuadas. Sin conocer estos aspectos del trabajo, resultaría imposible la comprensión completa del mismo.

1.2. Motivación

El porqué de este trabajo es intentar contribuir a mejorar la sociedad en la que vivimos, aportando una solución a un problema concreto de una actividad de gran relevancia e impacto en ella como es el transporte.

El sector transporte es el que produce un mayor consumo energético en España, con una participación superior al 41 % del consumo de energía total, ocho puntos más que la media europea según el último informe anual de Los Transportes y las Infraestructuras, del 2016, publicado por el Ministerio de Fomento [1]. Y dentro de éste, el transporte por carretera supone un 80 % frente al 17 % que ocupa el transporte aéreo. Esto hace que sea una de las actividades claves en nuestro país, y uno de los motivos por los que he elegido este trabajo.

Sin embargo, la cantidad de vehículos propulsados por combustibles alternativos es únicamente del 6 %, aunque durante los últimos años se ha observado un incremento progresivo de los mismos, como podemos apreciar en la parte izquierda de la Fig. 1.1. Se prevee además que, para los años sucesivos, haya un progreso todavía mayor de estos combustibles en el sector transporte, debido a la Directiva 2014/94/UE para la implantación de una infraestructura para vehículos con combustibles alternativos, que ya ha sido puesta en marcha en España mediante las aprobaciones del Marco de Acción Nacional para el desarrollo del mercado y las infraestructuras para combustibles alternativos en el sector transporte (MAN), así como, a través del Real Decreto 639/2016, de 9 de diciembre, sobre la infraestructura de combustibles alternativos. También sabemos que los combustibles alternativos más usados son los biocarburantes, con casi el 54 %, aunque se puede apreciar una tendencia de crecimiento grande tanto en el gas natural, debido en gran parte a su uso en flotas (camiones y autobuses), como en la electricidad, ver Fig. 1.1. Estos datos concuerdan además con los que apuntan que la demanda de estos combustibles alternativos se incrementó significativamente durante el año 2016: la asociada a la

electricidad (+46,0 %), el gas natural (+268,9 %) y los biocarburantes (+1,1 %)[2].

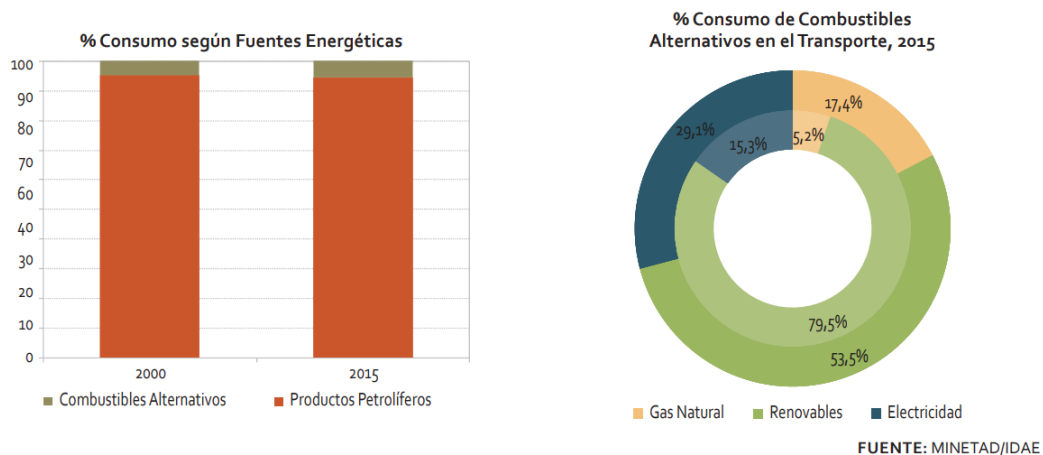


Fig. 1.1. Estructura de la demanda energética del sector transporte según fuentes energéticas, 2000-2015. [2]

Esta tendencia la vemos reflejada en nuestro día a día cuando observamos que cada vez más automóviles son propulsados por combustibles alternativos. Esto lo podemos atestiguar mediante hechos, tales como que en Madrid el 35,6 % de la flota de autobuses de la EMT son de tecnología GNC [3], o que las ventas de coches eléctricos en los últimos seis años hayan crecido de manera exponencial, ver Fig.1.2. También podemos fijarnos en la gran apuesta que están haciendo muchas marcas por los vehículos propulsados a gas, como Seat, que ya dispone de esta opción en varios de sus modelos.

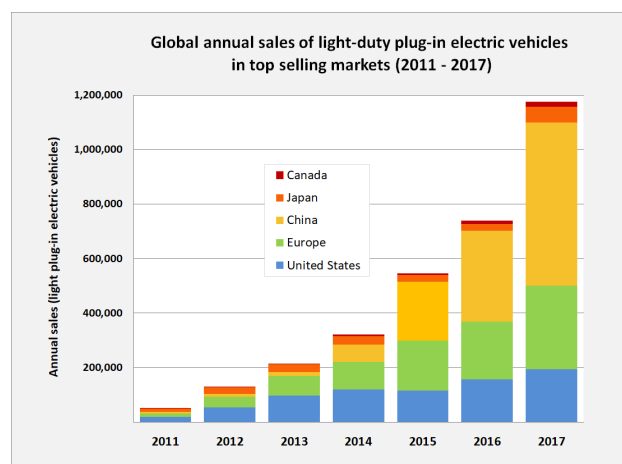


Fig. 1.2. Ventas anuales de vehículos eléctricos enchufables en el mercado mundial entre 2011 y 2017 [4].

Esta realidad de apostar cada vez más por los combustibles alternativos se debe, en gran parte, a que éstos tienen un menor impacto, tanto en el medio ambiente como en la salud directa de las personas.

Todos somos conscientes del fenómeno del cambio climático. Los datos recopilados en la actualidad muestran que la temperatura ha aumentado $0,8^{\circ}\text{C}$ y el nivel del mar 17 cm desde principios del siglo XX, o que los océanos se han acidificado un 30 % más desde el comienzo de la revolución industrial [5]. Según el informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), incrementar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre representa comprometer a nosotros mismos a largo plazo a vivir en un cambio climático, y eventualmente en un calentamiento global [6]. De todos los gases de efecto invernadero, el que más está afectando al calentamiento global es el CO_2 , como podemos apreciar en la Fig 1.3. mediante el índice anual de gases de efecto invernadero (AGGI) calculado por la NOAA Earth System Research Laboratory. Además, el aumento de la concentración de este gas en la atmósfera es el causante de la acidificación de los océanos.

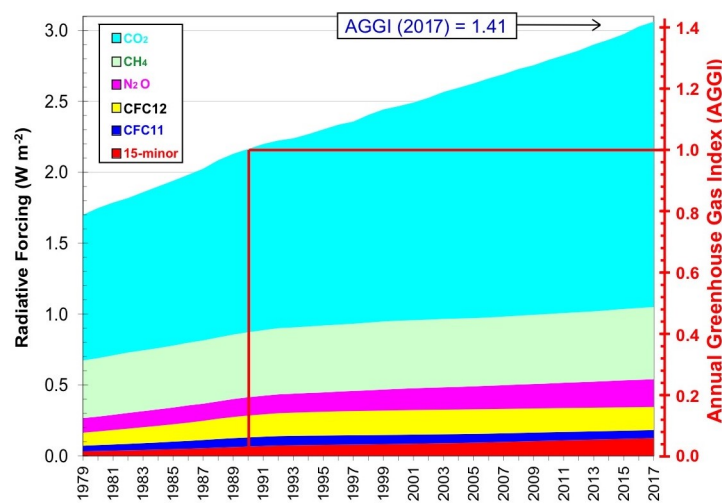


Fig. 1.3. Influencia directa en el clima de los cinco primarios y quince secundarios gases de efecto invernadero. [7]

Adicionalmente, sabemos que el transporte supone en España un 26,52 % del CO_2 total emitido en su territorio [8]. Con lo que podemos afirmar que, en la parte que nos toca en España, el transporte es uno de los sectores que más afecta al fenómeno del cambio climático. Pero esto, que podría ser un problema a medio y largo plazo, se ve agravado por otro problema que afecta más al corto plazo, la calidad del aire. Según la EEA (Agencia Europea Medioambiental) los dos contaminantes que suelen superar los límites recomendados por la Unión Europea son los PM_{10} y el NO_2 , y el transporte es el principal causante de que esto ocurra [9]. En España, hay zonas urbanas como Madrid, Barcelona o Granada que sobrepasan los niveles de NO_2 , y otras como Avilés o Vich que sobrepasan los de PM_{10} . Pero además de esto, cuando se encuentran juntos estos dos contaminantes y la luz solar, se genera ozono troposférico, el cual está por encima de los valores objetivos en toda la mitad sur de España [10].

Estos contaminantes aumentan el riesgo de sufrir problemas respiratorios graves, como la neumonía, y problemas crónicos, como el cáncer de pulmón, o enfermedades car-

diovasculares [11].

Debido a que, como hemos visto, el transporte es uno de los principales contribuyentes a estos problemas, podemos preguntarnos por qué los combustibles alternativos son menos perjudiciales medioambientalmente que los productos petrolíferos.

Los combustibles más usados en el transporte terrestre son el diésel y la gasolina, como anteriormente mencioné, con un 94 % del total de combustibles utilizados [2]. Aunque durante los últimos años se han ido aprobando normativas cada vez más restrictivas hacia los contaminantes que pueden emitir estos vehículos, siendo la última la normativa Euro VI, siguen siendo peores alternativas, dado que las emisiones totales asociadas de CO₂ tanto del diésel como de la gasolina frente al gas natural vehicular, son en España un 28,7 % y un 40,6 % mayores respectivamente [12]. Estas emisiones asociadas tienen en cuenta todos los procesos, desde la extracción en el lugar de origen hasta su entrega en el lugar de reposición, para las emisiones indirectas, y para las directas, el propio proceso de combustión en los motores teniendo en cuenta la eficiencia de los mismos [12]. Para comparar estos datos con las emisiones asociadas a la electricidad voy a calcularlas a partir del mix eléctrico, que es el valor que nos proporciona las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de electricidad. Este dato, varía bastante dependiendo del año en que se tome, siendo de 392 gCO₂/kWh en 2017, de 308 gCO₂/kWh en 2016, y de 398 gCO₂/kWh en 2015 [13], ya que depende de factores aleatorios, como la cantidad de viento, o la radiación solar, entre otros, y de otros factores, como por ejemplo, el lugar de procedencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, no tienen en cuenta las pérdidas por transporte y distribución de la electricidad, ni tampoco la eficiencia del motor, por lo que habría que añadirle factores correctores, siendo éstos 0,90 [14], y 0,95 [15], respectivamente. Mediante las ecuaciones (1.1) y (1.2) he obtenido el valor de las toneladas de CO₂ por terajulios asociadas a la electricidad en 2017 y 2016 respectivamente, en las unidades en las que aparecen los datos de los otros combustibles en el informe de Gas Natural [12].

$$\frac{392 \text{ gCO}_2}{\text{kWh}} \cdot \frac{10^6 \text{ kWh}}{3,6 \cdot \text{TJ}} \cdot \frac{\text{t}}{10^6 \text{ g}} \cdot \frac{1}{0,9 \cdot 0,95} = \frac{127,36 \text{ tCO}_2}{\text{TJ}} \quad (1.1)$$

$$\frac{308 \text{ gCO}_2}{\text{kWh}} \cdot \frac{10^6 \text{ kWh}}{3,6 \cdot \text{TJ}} \cdot \frac{\text{t}}{10^6 \text{ g}} \cdot \frac{1}{0,9 \cdot 0,95} = \frac{100,06 \text{ tCO}_2}{\text{TJ}} \quad (1.2)$$

Una vez que hemos obtenido los datos de todos los combustibles, es posible compararlos. Para ello he realizado la TABLA 1.1, en la que podemos ver como la electricidad es el combustible que menos CO₂ emite, además de hacerlo de manera indirecta, lo que permite diseñar sistemas de captura del mismo, aunque sea ésta una tecnología en ciernes. También se puede apreciar que la diferencia entre la gasolina y la electricidad es considerablemente grande, prácticamente el triple. Así mismo, vemos que el gas natural es la

segunda opción que menos emite, mientras que el diésel, es la tercera alternativa, aunque en estos últimos años su uso esté siendo penalizado en el centro de ciudades tales como Madrid o Barcelona, mediante el sistema de clasificación de vehículos en función de su potencial contaminante [16].

TABLA 1.1. EMISIONES ASOCIADAS DE CO₂ DEL TRANSPORTE TERRESTRE POR TIPO DE COMBUSTIBLE

Gasolina	Diésel	Gas Natural	Electricidad
322,87	269,06	191,61	127,36*
			100,06**
Todos los datos están en tCO_2/TJ			
*año2017 **año2016			
Fuentes: [12] y elaboración propia			

Pero como ya dijimos antes, otro de los problemas asociados a los vehículos, que posiblemente sea el más importante, es el deterioro de la calidad del aire. Por ello, vamos a ver como le afectan los diferentes combustibles. En la última normativa Euro VI implementada para turismos en 2014 se establecen unos máximos para contaminantes como el CO, los HCs, el NO_x, VOCs, las PM o el PN, según podemos apreciar en la TABLA 1.2.

TABLA 1.2. LÍMITES DE EMISIONES EN LA NORMATIVA EURO VI PARA AUTOMÓVILES Y VEHÍCULOS LIGEROS

CO	HCs	VOCs	NO _x	HCs+NO _x	PM	PN
Diésel						
0,50	-	-	0,080	0,170	0,005	$6 \cdot 10^{11}$
Gasolina						
1,0	0,10	0,068	0,060	-	0,005	$6 \cdot 10^{11}$
Todos los datos están en g/km						
Fuentes: [17]						

Analizando los límites de las emisiones de contaminantes en la TABLA 1.2, nos damos cuenta que son valores significativos, ya que según las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire, se estima que reduciendo la media anual de concentración de PMs de $35 \mu g/m^3$, valor común en países en desarrollo, a $10 \mu g/m^3$, se reduciría el número de defunciones asociadas a la contaminación aproximadamente en un 15 %. Pero que incluso en las zonas de la Unión Europea donde se cumplen los valores establecidos, se estima que la exposición a partículas de origen antropogénico reduce la esperanza media de vida en 8,6 meses [18].

Además de esto sabemos, gracias a estudios epidemiológicos, que los síntomas de bronquitis en los niños asmáticos aumentan con la exposición prolongada al NO₂, o que el ozono troposférico, que como explicamos antes se forma mediante la reacción de NO_x,

VOCs y PMs, la parte orgánica de éstas, y la luz solar, puede causar problemas respiratorios, provocar asma, reducir la función pulmonar y originar enfermedades pulmonares [18].

También es perjudicial para la salud el CO ya que es capaz de penetrar en el organismo a través de los pulmones, pudiendo provocar la disminución del oxígeno en sangre, así como disfunciones cardíacas, daños en el sistema nervioso, dolores de cabeza, mareos, y fatiga [19]. El monóxido de carbono también tiene consecuencias en el clima, ya que contribuye en la formación de gases de efecto invernadero. Debido a que de media es capaz de permanecer en la atmósfera tres meses, esto favorece a su reacción con el oxígeno para formar CO₂ y al mismo tiempo O₃.

Comparando los valores de emisiones que producen los vehículos propulsados por gas natural frente a los de los propulsados por diésel, según un estudio del Concilio Internacional para el Transporte Limpio, los de PMs y de NO_x se ven reducidos hasta llegar a ser cuatro veces menores [20], como podemos ver en la Fig. 1.4. En ésta aparecen los valores de NO_x, NO₂ y PM que generan dos autobuses homólogos propulsados por diésel y por GNC con distintas tecnologías, siendo la barra gris y la azul las de más avanzada tecnología en las dos alternativas de propulsión. Como podemos ver el gas natural posee una sustancial ventaja.

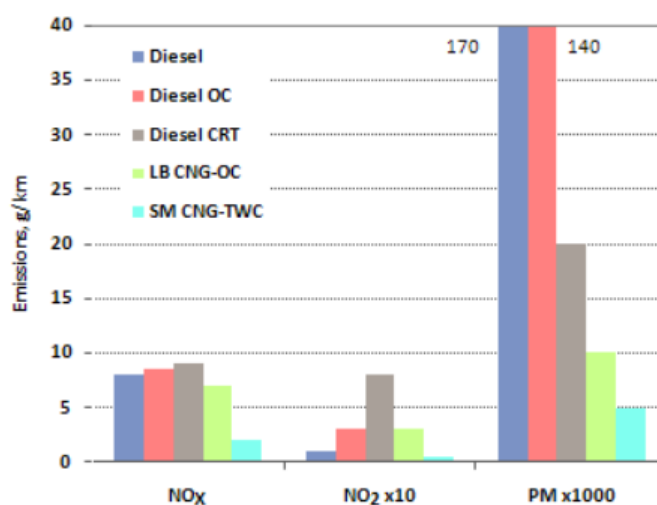


Fig. 1.4. Valores de emisiones de PM y NO_x en el ciclo OCTA para autobuses diesel y CNG [20]

Por último, los vehículos eléctricos tienen emisiones asociadas de estos y otros contaminantes pero no emiten directamente. Además, estas emisiones indirectas son puntuales en las zonas donde hay centrales eléctricas, que suelen estar alejadas de zonas grandes de población, por lo que no afectan tanto a la salud de las personas, aunque sí tienen otros problemas asociados como generación de residuos, vertidos, consumo de recursos naturales, etc [21], aunque esto varía mucho dependiendo del tipo de generación eléctrica que haya en cada país. Por tanto los efectos de los vehículos eléctricos en la calidad del aire de manera directa son nulos, pero de manera indirecta dependen totalmente del siste-

ma eléctrico con que se nutren, siendo generalmente mucho menores en la parte que les corresponde.

Después de este acercamiento a las consecuencias del uso de los diferentes combustibles usados en el transporte, podemos decir que el gas natural y la electricidad poseen grandes ventajas respecto a los combustibles tradicionales, y son estas ventajas las que han hecho que este trabajo se centre en los dos como fuentes de energía para vehículos.

1.3. Objetivos

En esta parte especificaré cuales son los retos que plantea desentrañar el trabajo y el alcance del mismo.

Los objetivos principales de este trabajo son:

- La obtención del consumo energético de dos autobuses de características similares, uno propulsado por electricidad y otro mediante gas natural comprimido, en tres ciclos de conducción distintos.
- La proposición de un sistema para la mejora energética de los autobuses.

Además de estos objetivos principales, este trabajo tiene también unos objetivos secundarios como son:

- La evaluación de los costes de adquisición y uso de los mismos durante su ciclo de vida.
- La exposición de las consecuencias medioambientales por el uso y masificación de éstos.

1.4. Contexto histórico

Para poder entender el sentido y la evolución de los autobuses, que es el elemento principal sobre el que gira este trabajo, hasta lo que son hoy en día, es necesario hacer un repaso a la historia de este medio de transporte.

Lo primero que hay que hacer por tanto es definir que es un autobús. La definición de la RAE de autobús es: Vehículo automóvil de transporte público y trayecto fijo que se emplea habitualmente en el servicio urbano [22].

Por lo tanto, basándonos en esta definición, lo más lejano que nos podemos remontar es hasta 1831 cuando el inglés Walter Hancock crea el primer autobús motorizado. Era un vehículo provisto de un motor de vapor, y era capaz de transportar hasta 10 pasajeros. Fue puesto en servicio entre las ciudades de Stanford y Londres (Inglaterra) y se lo bautizó como Infant.

Bien es cierto que existieron anteriormente sistemas de transporte públicos que podríamos considerar los precursores del autobús, como el que crea la compañía Enterprise Générale des Omnibus fundada por Stanislaw Braudy en 1826 en Nantes (Francia). El sr. Braudy era propietario de unos baños públicos, y pensó en una forma de transporte colectivo para que sus clientes tuvieran un mejor acceso a estos baños. Sin embargo, este medio de transporte era una máquina de sangre, ya que era un carruaje movido por caballos, por lo que no lo podemos considerar un autobús, ya que no era un automóvil.

Pero fue el alemán Karl Benz quien en 1895 crea el Benz Omnibús, ver Fig. 1.5, el primer autobús de gasolina de la historia, el cual contaba con ocho plazas, incluida la del conductor, ruedas neumáticas con recubrimiento de caucho, un accionamiento de correa de dos velocidades, y un motor monocilíndrico de cuatro tiempos y 5 cv de potencia, propulsado por gasolina. Su velocidad máxima era de 20 km/h y hacía un recorrido fijo de 15 km, que circulaba entre Siegen, Netphen y Deuz (Alemania), con cinco paradas y un total de ochenta metros de desnivel, en un tiempo de una hora y veinte minutos [23].



Fig. 1.5. Primer autobús de gasolina de la historia. Benz Omnibús 1895. [24]

Sin embargo, debido a los problemas técnicos, este autobús dejó de estar en funcionamiento al año siguiente, aunque en los años posteriores se abrieron nuevas líneas en las que los autobuses de Benz competirían con los de Gottlieb Daimler. Cuatro años más tarde de este suceso, en 1900, los hermanos Mack crean el primer autobús propulsado por diésel, el Mack Bus, ver Fig. 1.6.



Fig. 1.6. Primer autobús diésel de la historia. The Mack Bus 1900. [25]

Este autobús, que contaba con 40 cv de potencia y capacidad para veinte pasajeros, operaba para una empresa concesionaria turística en el Prospect Park de Brooklyn (EEUU). El vehículo llegó a acumular un millón de millas de servicio, y sería el primero en una larga lista de vehículos a cargo de los hermanos Mack [25].

No fue hasta 1906 cuando apareció en Francia la primera línea de autobuses motorizados, que hacía el recorrido entre Montmartre y Saint Germain des Prés, cubriendo una distancia de 5,8 kilómetros, aunque el medio de transporte más común seguía siendo el carruaje, y lo seguiría siendo unos cuantos años más. En la Fig. 1.7 se puede apreciar un autobús de dos plantas circulando por las calles de París en 1907, y también podemos ver que los carruajes seguían siendo los predominantes.



Fig. 1.7. Línea I de autobuses. Plaza Pigalle, París en 1907. [26]

Durante el periodo de la gran guerra (1914-1918) muchos autobuses en toda Europa son requisados y pasan a transportar tropas al frente, por lo que su desarrollo se estanca, y no será hasta principios de los años veinte cuando Benz empiece a introducir mejoras en la carrocería, y comiencen a aparecer diferentes versiones, autobuses urbanos, interurbanos, con y sin plataforma para estar de pie, con y sin portaequipajes en la parte superior, autobuses de dos plantas, etc. Todos los autobuses de entonces eran de gasolina, ya que los impulsores del motor diésel, los hermanos Mack dejarían aparcado el negocio de los autobuses hasta finales de los años treinta, cuando vuelven a implementar este motor en los autobuses modernos, siendo nuevamente pioneros en ello.

Fue a principios de los años treinta cuando el tráfico en las ciudades se empieza a masificar, debido al aumento de la producción y al abaratamiento de costes de los vehículos. Ésto comienza a causar muchos problemas a la hora de gestionar la movilidad en las ciudades, por ello, se plantearon el cambio de tranvías por autobuses en muchas ciudades, llegando a ejecutarse en París. Sin embargo, los autobuses de aquella época no eran capaces de transportar más de cuarenta personas, por lo que este cambio no era efectivo. De todas formas, esta idea insuflada por la prensa termina cuajando y comienza su puesta en marcha en 1932, cuando entre la compañía de transportes francesa STCRP y Renault construyen 1020 nuevos autobuses que son capaces de llevar a cincuenta personas, que aunque sigue siendo insuficiente para suplantar la demanda sofocada hasta entonces por

los tranvías, ese mismo año se decide eliminar toda la red de tranvías de París. Este proceso termina en 1938 y, para entonces, París gestiona la red de autobuses más grande del mundo, con 176 líneas y más de 3500 autobuses.

Sin embargo, en agosto de 1939 Alemania invade Polonia, y sucede lo mismo que sucedió en 1914, una gran cantidad de autobuses son requisados y enviados al frente. Entonces los autobuses pasan a un segundo plano, convirtiéndose el metro en el medio de transporte urbano más usado. Durante estos años de guerra se produce un agotamiento de recursos y comienza a sustituirse la gasolina por alcohol etílico, y como su rendimiento es pésimo, termina por cambiarse por gas de la ciudad, que era gas sin comprimir. En la Fig. 1.8 podemos apreciar un autobús con un tanque de gas, el cual rellenaban en cada terminal.



Fig. 1.8. Una TN6A de la línea 125, equipada con un gasificador, está esperando la hora de salida en Porte d'Orléans. [27]

Por todo esto, hasta el final la guerra no comienza a recuperarse la industria del transporte y con ella el autobús. Pero aún tardaría unos años en volver a los números anteriores a la guerra. Fue en este periodo de posguerra cuando definitivamente el tranvía comienza a desaparecer y se sustituye en toda Europa por el autobús. Esto se debe, en gran medida, a la creación en 1951, por parte de Mercedes Benz, de un modelo de autobús que presenta unas innovaciones que no han perdido vigencia y se mantienen hoy en día: el modelo O6600H, ver Fig. 1.9. Este modelo es el primero que combina un motor ubicado en la parte posterior del autobús, con una carrocería avanzada de aluminio y de bordes redondeados para una mejor aerodinámica, que tuvo gran influencia de la aeronáutica desarrollada durante la segunda guerra mundial, y con una capacidad de 120 personas los primeros modelos y hasta 240 los últimos. De esta manera, no solo se mejora la eficiencia del autobús, sino la calidad de vida de los conductores, que estaban muy expuestos al ruido procedente del motor, y que al llevarlo a la parte trasera del autobús además gozarían de mayor espacio.



Fig. 1.9. Mercedes-Benz O 6600 H en uso en la ruta Colonia-Gleuel alrededor de 1956/1957. [28]

En los años posteriores, Mercedes Benz junto con Daimler comienzan a producir modelos muy similares a éste con pequeñas modificaciones. Por aquellos tiempos el mundo del automóvil empieza a sufrir muchos cambios, como la aparición de los turbocompresores, que comienzan a producirse en serie en Estados Unidos en 1963, de la mano de Chevrolet y Oldsmobile , aunque a Europa llegarían diez años más tarde con BMW, la introducción de suspensiones o las mejoras en la dirección entre otros. También van apareciendo los autobuses de suelo bajo, que se extenderán en zonas urbanas. Todas estas mejoras responden a la estabilidad y el esplendor económico de aquellos años, que se ve reflejado, por ejemplo, en el aumento de natalidad, el llamado Baby Boom, lo que hace que durante los años posteriores las necesidades de movilidad en las ciudades aumenten y con ello la industria de los autobuses. En España la principal productora de autobuses era la marca Pegaso, que suministraba a las compañías de transporte de las grandes ciudades. Madrid, por ejemplo, tubo como uno de sus primeros modelos el Pegaso 6035, que aparecía ya en versiones articuladas ver Fig. 1.10.



Fig. 1.10. Pegaso 6035. Uno de los primeros autobuses articulados de la EMT en los años setenta. [29]

Situándonos ya en la década de los ochenta, la idea de un posible calentamiento global comienza a instalarse en el pensamiento de las personas a causa de una gran publicidad por parte de los medios de comunicación. Esto hará cambiar drásticamente el rumbo que llevaba la industria hasta entonces, que había sido aumentar las prestaciones, pero sin

tener en cuenta demasiado ni la eficiencia, ni las posibles consecuencias de ello. A partir de aquí, se empezarán a tomar medidas para el control de las emisiones de contaminantes y rendimientos de los vehículos, amparadas en leyes como las normativas europeas sobre emisiones, que comenzaron con la Euro I de 1992 y que continúan hasta hoy.

Por estos motivos, durante las tres últimas décadas el parque de autobuses ha cambiado sustancialmente. Como ha ocurrido en Madrid que desde 1994, cuando empezaron a prestar servicio regular los primeros autobuses que se fabricaban de GNC, la flota de autobuses ha pasado de ser completamente diésel a tener 1,5 % autobuses híbridos, 1,7 % eléctricos, un 62,5 % de GNC y un 34,33 % de diésel, estimándose que para 2020 la totalidad de la flota será de los tres primeros tipos.

Estas tecnologías están aún en diferentes etapas de maduración, lo que se refleja en los porcentajes, por eso lo que vemos hoy, como he apuntado a lo largo de este resumen, puede ser muy distinto a lo que veamos mañana. Por tanto, en este trabajo intentaré responder hacia donde nos dirigimos o nos deberíamos dirigir. Para ello, voy a partir de un modelo actual de autobús, propulsado por gas, ver Fig. 1.11, y lo compararé con su homólogo eléctrico.



Fig. 1.11. Autobús de la EMT. Línea 87. Breda Menarinibus Vivacity + C CNG. [3]

2. DESARROLLO

2.1. Tecnologías involucradas

Con el propósito de poner en contexto este trabajo, y comprender lo que voy a desarrollar durante la ejecución de los cálculos, es necesario explicar cuales son las tecnologías que voy a utilizar.

Como ya comenté anteriormente, y según la definición de la RAE, un autobús es un vehículo automóvil. Pero para entender el alcance de este trabajo, es necesario ampliar esta simplificación. Para ello, voy a tomar la definición del libro *Teoría de los vehículos automóviles*, que dice que un vehículo automóvil es una máquina cuya finalidad es transportar a personas o cosas de un lugar a otro, que está provista de al menos cuatro ruedas neumáticas, propulsión mecánica y sistemas para orientar la dirección y reducir la velocidad pudiendo detenerse. Además debe desplazarse de manera autónoma y está diseñado para moverse por superficies preparadas sin quedar sujeto a una trayectoria condicionada [30].

Esto quiere decir, que el elemento clave para dar a un vehículo el calificativo de automóvil, es el motor, que hace que funcione de manera autónoma. Por ello, diferenciamos los vehículos dentro del mismo segmento mediante la clasificación del motor, y la diferencia más significativa entre los motores es la fuente de energía que utilizan.

Por lo tanto, voy a separar este apartado en dos secciones, en las que explicaré el funcionamiento de los dos modelos de autobús, centrándome en las principales diferencias entre uno y otro. Pero antes, voy a explicar brevemente el funcionamiento general de un autobús.

Un autobús se podría esquematizar como una estructura sólida semihueca en forma de prisma cuadrangular con una de las caras mayores paralela al suelo, que consta de dos ejes con cuatro ruedas, sobre las que se apoya la estructura, y un sistema de propulsión en uno o en los dos ejes. Pero además, consta de un sistema de dirección en el eje delantero que le permite cambiar la trayectoria del mismo, y un sistema de amortiguación para reducir las vibraciones y mejorar la comodidad y la estabilidad. Los autobuses de hoy en día también disponen de varios sistemas electrónicos que controlan prácticamente todo, desde el funcionamiento del motor, hasta sistemas de iluminación. Además, tienen equipamientos para mejorar sus prestaciones, como el aire acondicionado, sistemas basculantes, apertura de puertas automática, radio, cámaras de videovigilancia, sensores de todo tipo, etc.

2.1.1. Autobús de GNC

En este apartado me refiero al autobús de GNC como un autobús que utiliza exclusivamente gas natural comprimido como combustible para su funcionamiento. Por lo tanto, lo primero que voy a definir es la composición de GNC y como se almacena para que pueda servir de combustible en un vehículo. Continuaré con las explicaciones del funcionamiento del motor de gas natural y de distintos sistemas que configuran las mayores diferencias respecto a un autobús eléctrico.

Combustible

El GNC es gas natural que se comprime hasta 200 bares de presión. El gas natural es un combustible fósil conformado por una mezcla de gases, el principal es el metano, el más ligero y estable de todos los hidrocarburos, que se encuentra en una proporción del 90 % aproximadamente, pero también contiene etano, propano, butano y pentanos, y en una proporción mucho menor, otros gases como H_2S , N_2 y CO_2 . Se depura antes de su transporte y distribución, y aunque genuinamente es inodoro, se odoriza para facilitar su detección en caso de fuga [31]. Sin embargo, no experimenta prácticamente ninguna transformación química desde su obtención hasta su consumo, y es por eso, que se le llama natural. Éste se forma debido a la acción bacteriana sobre sedimentos orgánicos atrapados bajo tierra con el paso de millones de años.

Tiene un poder calorífico inferior de 50 MJ/kg, aunque esto varía dependiendo de la pureza del mismo, siendo algo mayor que el de la gasolina o el diesel, de 43 MJ/kg ambos. Tiene una capacidad de inflamabilidad entre el 5 % y el 15 % de volumen en aire, una temperatura de flash point de $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una temperatura de autoignición de unos $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a que tiene una alta temperatura de autoignición en comparación a otros combustibles como el diésel, de $210\text{ }^{\circ}\text{C}$, el gas natural no puede ser utilizado en un motor de encendido por compresión. Por ello, se utiliza en motores de ignición forzada. Además de esto, que su flash point sea muy bajo le confiere una peligrosidad relevante. Para paliar este problema se han establecido medidas de seguridad para su uso e instalación, especificadas en el Reglamento UN ECE 110, desde Julio de 2001, lo que hace que no sea más peligroso que un autobús convencional.

El gas natural se almacena en pequeñas bombonas cilíndricas clasificadas en varios tipos según el material del que estén fabricados, siendo acero al cromo-molibdeno el más común.

El gas al estar comprimido, alcanza una densidad de 158 kg/m^3 , a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. El hecho de estar a tanta presión hace que las bombonas tengan un espesor considerable y por cada 20 kg de gas natural necesitamos unos 70 kg de material de la bombona. Debido a esto han empezado a producirse bombonas recubiertas de materiales compuestos ver Fig 2.1, lo que llega a reducir el peso de un autobús en 450 kg. Esto, sumado a la mejor eficiencia de estos motores comparado con los de combustibles convencionales, hace que no hagan

falta un gran peso ni volumen para alcanzar una autonomía razonable. En el caso de los autobuses estas bombonas suelen estar dispuestas transversalmente en el techo.



Fig. 2.1. Bombonas Tipo III y Tipo IV, de materiales compuestos, de Hexagon Composites en un autobús. [32]

Motor

Debido a que el gas natural es un combustible con una alta temperatura de autoignición, no es posible utilizar un ciclo diésel para aprovechar su energía interna, ya que habría que llegar a unas temperaturas muy altas, subiendo mucho la presión en el cilindro, y por tanto, la inyección tendría que ser a presiones realmente altas, por eso utilizamos un ciclo de ignición forzada, el Ciclo Otto. Es cierto que ya hay estudios acerca de los motores duales, que utilizan diésel y gas natural, apuntando a su beneficio, pero no están dentro del alcance de este trabajo.

El Ciclo Otto ideal, ver parte izquierda de la Fig. 2.2, es un ciclo termodinámico que modela el comportamiento de un motor de explosión. Consta de seis fases termodinámicas: expansión a presión constante, compresión adiabática, calentamiento a volumen constante, expansión adiabática, enfriamiento a volumen constante y compresión a presión constante. Estas seis fases se desarrollan en cuatro fases de operación del ciclo: admisión, compresión, expansión y escape.

Lo primero es la admisión, donde entra una mezcla de aire y combustible al cilindro, en nuestro caso gas natural, mientras el pistón baja con la válvula de admisión abierta. Más adelante, se cierra la válvula y el pistón sube comprimiendo la mezcla, a causa de la velocidad se supone que no da tiempo a la mezcla a intercambiar energía con el ambiente por lo que se supone un proceso adiabático, aunque en realidad no lo es debido a la fricción. Después de la fase de compresión, cuando el pistón está en el punto más alto, se produce la chispa. El calor que se genera en la combustión hace que aumenten la temperatura y presión, ya que el pistón no ha tenido tiempo de bajar. Esa energía produce un trabajo sobre el pistón empujándolo y produciendo la expansión. Por último, se abre la válvula de escape y los productos de la combustión salen al exterior empujados por el pistón.

El motor regula la entrada y salida de aire y combustible a los pistones mediante la apertura y cierre de válvulas a través del árbol de levas. Éste es un eje con resortes que empuja las válvulas. Después, el proceso cíclico que se produce en el interior de los pistones genera el par sobre el cigüeñal, a través de un sistema de bielas, que será transmitido al tren de potencia.

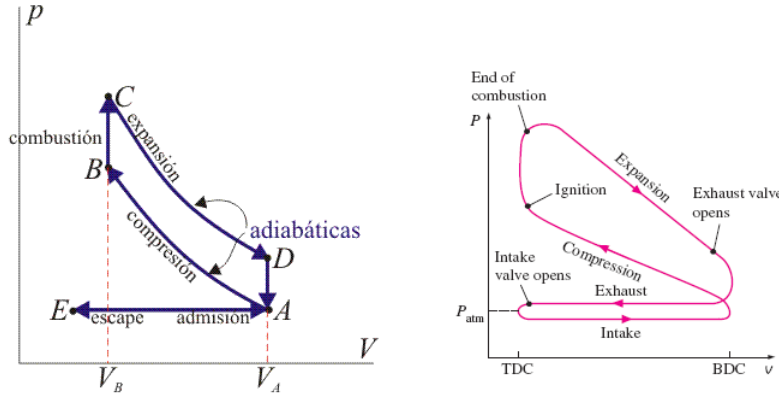


Fig. 2.2. Ciclo Otto ideal y real. [33]

Una vez conocido el modelo, podemos obtener el rendimiento del mismo. Para ello definimos r , la relación de compresión, como la división entre el volumen al inicio de la compresión y el volumen al final de la misma. También necesitamos el coeficiente de dilatación adiabática γ , que en nuestro caso es una constante de valor 1,4 aproximadamente, ya que depende del gas que estemos tratando, que para nosotros sería aire entre un 85 %-95 % y gas natural entre un 15 %-5 %. De esta manera podemos reducir la expresión (2.1) del rendimiento utilizando una de las ecuaciones de gases ideales para procesos adiabáticos (2.2), y comprobar que depende únicamente de la relación de compresión y de gamma, aunque como ésta es cuasiconstante, podríamos decir que el rendimiento del ciclo solo depende de r según la ecuación (2.3) [33].

$$\eta = \frac{W}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{T_A}{T_B} \quad (2.1)$$

$$TV^{\gamma-1} = cte \quad (2.2)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (2.3)$$

Entonces ya podemos explicar porqué los motores de gasolina tiene menor rendimiento que los de gas natural cuando funcionan con el mismo ciclo. Para hacer esto, lo primero que tenemos que decir es que el Ciclo Otto en realidad tiene un comportamiento no reversible, ver parte derecha de la Fig. 2.2. Debido a que los procesos tienen pérdidas y a que no son instantáneos, se producen adelantos y retrasos en las aperturas y cierres de válvulas, así como un avance al encendido debido al tiempo que tarda en producirse la

combustión. Todos estos fenómenos propician que el rendimiento se reduzca, pero estos procesos son prácticamente idénticos entre gasolina y gas natural.

Aún así, la manera más significativa para mejorar el rendimiento del ciclo es aumentando la relación de compresión. Sin embargo, esto no lo podemos hacer indefinidamente ya que podríamos llegar a la temperatura de autoignición antes de que se produzca la chispa, lo que terminaría destruyendo el motor. Por ello, debido a que el gas natural tiene una temperatura de autoignición mayor, podemos conseguir una relación de compresión mayor cuando lo utilizamos y por tanto un mejor rendimiento. Por eso, implementar turbocompresores en motores de gas natural es prácticamente obligado, igual que en el diésel, ya que mejoran directamente el rendimiento. No es así en la gasolina, que aunque mejora el rendimiento con el uso de turbocompresores, esto es debido al downsizing, que es la reducción del tamaño de los motores de la misma potencia añadiendo turbocompresores, lo que produce una mejora del rendimiento debido a la disminución de pérdidas por inercia.

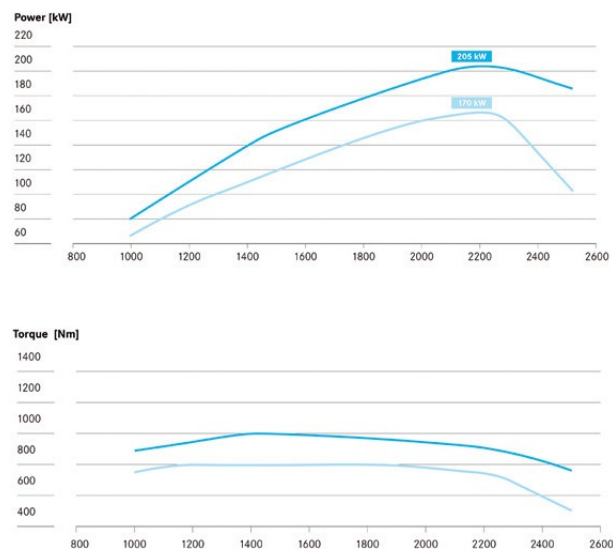


Fig. 2.3. Desempeño del motor MB M 906 LAG. [34]

Otro aspecto relevante directamente relacionado con el motor es la entrega de potencia. Los motores de combustión tienen una entrega de potencia gradual que podemos observar muy bien en una gráfica típica de potencia-revoluciones y par-revoluciones. El par es el momento de fuerza que ejerce el motor sobre el eje de transmisión. En la Fig. 2.3 podemos observar como varían la potencia y el par en el motor Mercedes Benz M 906 LAG de gas natural en dos modelos, de 205 KW y 170 KW, que lleva el autobús de la Fig. 1.11, y que utilizaré durante el transcurso del trabajo.

También es necesario lubricar todas las piezas mecánicas que tengan movimiento relativo para su óptimo funcionamiento y durabilidad. Además, es indispensable refrigerar el motor, para que las piezas no alcancen las temperaturas que harían que comprometiera su funcionamiento debido a la fatiga, ésto generalmente se hace con un circuito de refrigeración con líquido anticongelante.

Sistema de transmisión

El elemento principal de este sistema es la caja de transmisión. Ésta es un elemento mecánico encargado de obtener en las ruedas el par necesario para poner en movimiento el vehículo, y una vez en movimiento vencer las resistencias al mismo.

Debido a que los motores térmicos tienen un rango de funcionamiento entre las 1.000 y las 6.000 rpm aproximadamente, aunque su rango de funcionamiento normal es más pequeño, solo son capaces de aumentar la velocidad como máximo seis veces, y llevando al motor fuera de su zona óptima de funcionamiento. Usualmente tenemos un rango de velocidades en los vehículos de 0 km/h a 180 km/h, y el motor por si solo no es capaz de alcanzar ese rango por lo que necesita un sistema que le ayude a conseguir este propósito. Además de esto, para aumentar la maniobrabilidad de los vehículos es necesario que dispongan de una marcha atrás, que le permita cambiar el sentido de movimiento de las ruedas sin cambiar el sentido de movimiento del motor, ya que en este caso no es posible. Para ello se utilizan las cajas de transmisión, que son un conjunto de engranajes de distintos tamaños con capacidad de engranar y desengranar, mediante un embrague y un selector, que reducen o aumentan los rangos de velocidad del vehículo.

También hay otro problema debido al rango de funcionamiento, que es el arranque del motor térmico. Para poder arrancar un motor térmico necesitamos la ayuda de un motor eléctrico y una batería para suministrar la energía a éste, así como un alternador para recargar esta batería.

Generalmente los autobuses de hoy en día, y más en concreto el que voy a usar durante este trabajo, utiliza un sistema de transmisión automático capaz de realizar los cambios de marcha sin necesidad de la intervención del conductor.

Tratamientos de postcombustión

Para reducir en gran medida los contaminantes que produce la combustión de gas natural comprimido en un motor de combustión, como son CO, CO₂, NO_x, CH₄, SO₂ y PMs, hay que utilizar tecnologías de tratamiento de gases de escape. Para ello, se han aprovechado las tecnologías que mejor encajan con este proceso, entre las ya existentes en el mundo del automovilismo.

Las tecnologías de tratamiento de gases de escape que se utilizan en los vehículos de gas natural comprimido son el EGR, el catalizador de tres vías y el catalizador de oxidación. Cada una de estas tecnologías influye de manera diferente y está focalizada en reducir parcialmente uno o más contaminantes.

La primera que voy a explicar es el EGR. Se trata de un sistema que redirige parte de los gases de escape al colector de admisión, que es donde se distribuye la mezcla de aire y combustible para volver a ser combustionados. El uso de esta tecnología permite reducir el NO_x hasta un 80 % y el consumo de combustible entre un 19 % y un 27 % [20].

El inconveniente del EGR es que aumenta los PMs, por lo que para paliar esto hay que utilizar además las otras tecnologías.

En el tubo de escape nos encontramos el catalizador de tres vías, que es un dispositivo donde se reducen simultáneamente CO, NO_x y HCs. Consiste en hacer pasar los gases de escape por un circuito de monolitos cerámicos y metálicos que producen una serie de reacciones de reducción y oxidación, cuyos productos son mayoritariamente H₂O y CO₂. Esto hace que se reduzcan los contaminantes ya nombrados a costa de aumentar el CO₂ producido. Este sistema solamente muestra una eficiencia útil cuando la reacción de combustión se produce en valores muy cercanos al estequiométrico, por lo que hay que gestionar de manera precisa las proporciones de la mezcla aire-combustible. Para ello, se utiliza un sensor de oxígeno, la sonda lambda, que mediante un sistema de bucle cerrado envía la información a la centralita electrónica para que cambie las proporciones de aire y gas natural.

Para reducir el aumento de las PMs causado por el uso del EGR, podemos utilizar un catalizador de oxidación, ajustando la proporción de SOF, que son partículas líquidas de combustible no quemado y lubricante absorbidas en partículas de hollín y también en forma de aerosoles [35]. Este catalizador funciona de forma similar al de tres vías pero solo reaccionan el CO y los HCs, y genera mayoritariamente H₂O y CO₂.

El impacto que tienen estas tecnologías sobre los PM y los NO_x y como han ido evolucionando en los motores de autobuses de gas natural comprimido se puede apreciar en la Fig. 2.4.

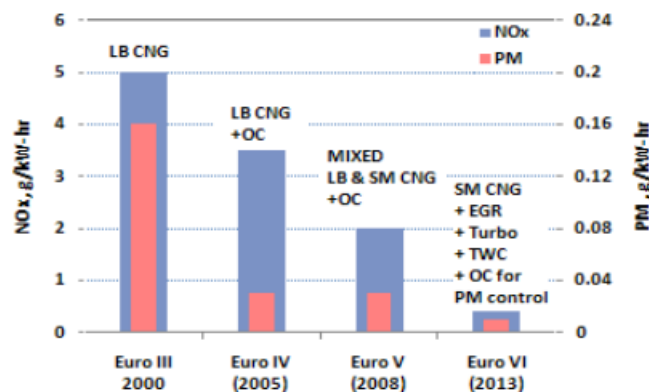


Fig. 2.4. Emisiones de PM y NO_x durante la evolución de los autobuses de GNC, de la Euro III a la Euro VI [20]

Sistema de repostaje

Los equipamientos de repostaje de GNC están regulados por normativas europeas, que tienen el propósito de estandarizar la red de suministro en todo el continente.

Las normativas EN 13683 y EN 13945 legislan el suministro de gas natural compri-

mido a vehículos y los equipos de llenado, así como las condiciones y demás requisitos para su operación.

Entre otras cosa se estandariza el sistema de llenado, con los NGV que para el caso de los autobuses sería el NGV2. En la Fig. 2.5 podemos observar dos bocas de llenado estándar tipo NGV2.



Fig. 2.5. WEH® Boca de llenado de combustible TK26 CNG para autobuses y camiones (NGV2) [36]

La mayoría de las estaciones de recarga poseen el gas natural ya comprimido por lo que el tiempo de repostaje es similar al de un autobús de características próximas convencional. En España hay un total de 28 estaciones de GNC funcionando y otras 20 de próxima apertura. Solo en la comunidad de Madrid hay 14 [37].

2.1.2. Autobús eléctrico

En este apartado voy a referirme al autobús eléctrico como aquel que únicamente utiliza la electricidad como fuente de energía directa para moverse, atendiendo a la definición primera de autobús. Por lo que no voy a tratar ni los autobuses híbridos, que tienen un motor térmico, ni los trolleybus, los cuales están sujetos a un cable superior que le suministra la corriente en movimiento.

Voy a comenzar exponiendo unas ideas generales acerca de la electricidad y su forma de almacenamiento en un vehículo, para continuar con el motor y demás sistemas diferenciadores con respecto al autobús de gas natural.

Fuente de energía

La electricidad es el conjunto de fenómenos de la física que están relacionados con la presencia y el flujo de cargas eléctricas. Además, como ya sabemos, ésta se encuentra estrechamente relacionada con el magnetismo, por lo que hoy en día son considerados como un solo fenómeno, el electromagnetismo.

Pero no solo estamos tratando de autobuses movidos gracias a estos fenómenos, sino

de aquellos que cuentan con la capacidad para moverse sin necesidad de un sistema de aporte de energía externo continuo. Trataremos, por tanto, de aquellos que precisan de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica que forme parte de su conjunto.

La manera más extendida de almacenamiento de electricidad en los vehículos son las baterías eléctricas recargables. Las baterías están compuestas por una o más celdas electroquímicas que son capaces de convertir la energía química almacenada en corriente eléctrica. Las celdas electroquímicas están formadas por dos electrodos y un electrolito. Los electrodos son los materiales semiconductores que hacen que se produzcan las reacciones de oxidación y reducción, mientras que el electrolito es la sustancia en la que se encuentran los electrodos, con gran densidad de iones y que permite su movimiento.

Pero además de las baterías existen los condensadores, que son la manera directa de almacenar energía eléctrica mediante un campo eléctrico. Están compuestos por dos placas conductoras o superficies conductoras, separadas por un dieléctrico o el vacío. Aunque en los vehículos lo se utilizan los supercondensadores. Estos, son condensadores en los que el área de los electrodos es aumentada, en gran medida, mediante el uso de materiales de gran porosidad, como el grafeno. Debido a que la capacidad aumenta con el área, como podemos ver en la ecuación (2.4) que describe el funcionamiento de los capacitores, donde ϵ es la permitividad del medio, A es el área y d la distancia, poseen una gran capacidad de carga.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

En los últimos años también han aparecido otras alternativas, aunque no han sido implementadas en ningún vehículo todavía, como las baterías de flujo. Este tipo de baterías se recargan añadiéndoles dos fluidos, que son los electrodos positivo y negativo, y funciona mediante dos tanques, que los almacenan por separado. La reacción química tiene lugar en otra zona distinta de los tanques, por lo que permite rellenarlos cuando se necesita energía. Este sistema tendría grandes ventajas de autonomía pero el problema de tener que llevar dos tanques más pesados de lo normal [38].

Las características necesarias del sistema de almacenamiento eléctrico para su uso en un vehículo son principalmente la cantidad de energía que puede almacenar por unidad de masa o volumen, la densidad de potencia que puede proporcionar, su fiabilidad, duración, seguridad y coste [39].

Los principales tipos de baterías que se utilizan en vehículos eléctricos son las de ion-litio ya que son las que presentan las características mencionadas anteriormente en una medida suficiente, a pesar de seguir siendo bastante caras hoy en día.

Estas baterías funcionan con un electrolito líquido, aunque también están empezando a investigarse las de electrolito sólido que parecen tener grandes ventajas [38]. Tienen una densidad de energía media de 150 Wh/kg, un voltaje de celda muy alto de (3,7 V), tiene

una autodescarga del 5 %, no tiene efecto memoria, es decir, tiene una alta resistencia a la descarga cuando las baterías no son usadas por largos periodos. Además de esto, tienen una eficiencia en carga del 80 % y en descarga del 90 %, y poseen una vida de ciclos de carga/descarga muy alta, de 1000 ciclos [39].

Debido a que las baterías se calientan cuando están en funcionamiento, necesitan un sistema de refrigeración, ya que si no lo tuvieran podrían llegar a sobrecalentarse. Ésto puede producir su deterioro e incluso la explosión de las mismas debido a que se forman gases calientes que comienzan a aumentar la presión en el interior de la batería.

La principal normativa que regula el uso de baterías en Europa es la Directiva (2006/66/CE) del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de septiembre de 2006 referente a las pilas, los acumuladores y los residuos de éstas. En ella se establecen tres tipos de baterías: portátil, industrial y automóvil, y trata principalmente de reducir su impacto sobre el entorno, así como regular su uso.

Sistema motor

El elemento principal es el motor eléctrico, que se encarga de transformar la energía eléctrica en energía mecánica. Está formado por un estator y un rotor. El rotor posee un bobinado cuyo campo magnético es opuesto al del estator. De esta manera, y gracias a un colector rotativo que permite cambiar la polaridad para que el motor siga girando y no se detenga, mediante la fuerza electromagnética que se produce, gira el rotor.

Hay dos modelos principales de motores eléctricos, de corriente continua y de corriente alterna. Los más utilizados en automovilismo son los de corriente alterna, y más concretamente los motores síncronos. Los motores síncronos se caracterizan por poseer una velocidad de rotación directamente proporcional a la frecuencia de la corriente de la red alterna que lo sustenta, y pueden funcionar como motores o como generadores, lo cual es indispensable para el uso del freno regenerativo.

A la hora de fabricar estos motores hay dos variantes, usar imanes permanentes, lo que implica el uso de tierras raras para su fabricación, las cuales son caras, o utilizar electroimanes, lo cual consume electricidad de las baterías. En cuanto a eficiencia es mejor lo primero, pero según como evoluciona el mercado parece que lo segundo es un mejor modelo de negocio, debido a la dependencia que genera un material escaso como son las tierras raras.

Las principales ventajas del motor eléctrico son su eficiencia, que para el rango de potencia que voy a utilizar es de un 95 % [15], su capacidad de entrega de potencia y par, que es en el caso de la potencia proporcional a las revoluciones del motor hasta llegar a la máxima y en el caso del par es máximo desde el principio hasta llegar a altas vueltas donde baja, como podemos observar en la Fig. 2.6. Además, posee otras ventajas como su capacidad para funcionar como generador y de cambiar su sentido de giro de manera muy sencilla, así como el hecho de que no genera contaminantes de manera directa.

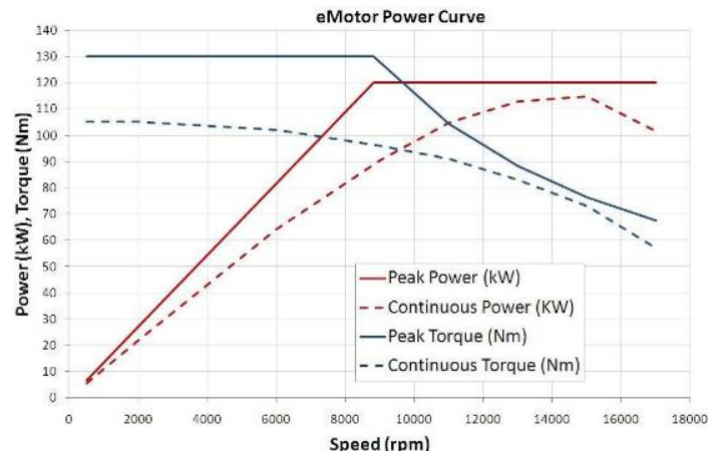


Fig. 2.6. Curvas de par y potencia frente a revoluciones por minuto de un motor eléctrico. [40]

Gracias a su entrega inmediata de máxima potencia no necesitamos un sistema diferente para el arranque, ni un sistema de transmisión complejo. Aunque para poder utilizar este motor necesitamos un inversor que cambie la corriente directa procedente de las baterías en corriente alterna para alimentar el motor y viceversa cuando éste funciona como KERS o freno regenerativo, que es un sistema que permite recuperar energía durante las frenadas, haciendo que el motor actúe como generador.

El problema del frenado regenerativo es que hace que el vehículo generalmente necesite dos motores eléctricos, ya que las baterías que se utilizan para alimentar al vehículo no tienen la capacidad de absorber y devolver mucha energía en poco tiempo durante un número elevado de ciclos, por lo que este sistema funciona con supercapacitores, que son extremadamente caros, y por tanto, no podemos usar solamente este sistema como almacenamiento principal. Por ello, normalmente los vehículos eléctricos cuentan con varios motores, uno principal, generalmente en el eje trasero y conectado al sistema general de alimentación, y otro más pequeño que funciona como KERS, con un supercondensador de almacenamiento pequeño. Aún así, en ocasiones, se utiliza un único motor.

Además de esto, necesitamos una reductora en el motor principal para ajustar las vueltas a las que funciona el motor con el rango de velocidades de los vehículos. También podemos utilizar un sistema de interruptores para invertir el sentido de giro del motor para ir marcha atrás.

Sistema de recarga

La forma de recargar la energía en un vehículo eléctrico es, generalmente, mediante un cable. Hay vehículos que son capaces de utilizar la carga por inducción, lo que para los autobuses puede ser una oportunidad para realizar cargas rápidas en las paradas. Aún así, la forma más habitual de recarga es mediante una conexión, generalmente mediante enchufe pero también están empezando a proliferar las cargas mediante un sistema de pantógrafo invertido que se engancha a la parte superior del autobús, como se puede ver

en la Fig. 2.7. Esta novedad tiene como ventaja frente a los enchufes, un menor tiempo de recarga, debido a su mayor capacidad de transferencia de energía, de 300 KW a 400 KW de potencia. Esto permite cargar una batería de autobús de 125 kWh al 80 % en menos de 8 minutos, lo que sería perfecto para instalar al final de las líneas [41]. La inversión inicial, sin embargo, sería mayor que la de los enchufes, pero debido a las mejores prestaciones se puede obtener mayor rentabilidad de estos.



Fig. 2.7. Dispositivo de carga rápida para autobuses eléctricos mediante pantógrafo conectado a uno. [42]

Los enchufes se han estandarizado clasificándolos por el tipo de conexión y recarga que llevan a cabo. Existen cuatro modos o tipos: el modo uno, el modo dos, el modo tres y el modo cuatro. De manera que según aumenta el modo aumenta también la velocidad de carga. Siendo el modo cuatro el más potente con hasta 240 KW de potencia, aunque en España lo normal es que sean de 125 KW. Las instalaciones de este tipo de zonas de carga son también bastante caras aunque menos que las de pantógrafo invertido.

El suministro de electricidad estaba regulado por la Ley 54/1997, de 27 de Noviembre, del Sector Eléctrico. En el año 2010 aparece la figura del Gestor de Carga del Sistema, que es un agente habilitado para la venta de energía eléctrica destinada a vehículos. Mediante el Real Decreto 647/2011 se regulan los derechos y deberes del Gestor de Carga. Además existe la Comisión Electrotécnica Internacional, la IEC, que a través de normativas como la IEC 61851 o la IEC 62196, se establecen los requisitos y estándares para llevar a cabo esta actividad, como los tipos de carga anteriormente nombrados.

2.2. Caso de estudio

En este apartado voy a obtener, mediante un sistema de simulación, la energía que consumen dos autobuses de características homólogas, uno propulsado por gas natural comprimido y otro mediante electricidad, en diferentes entornos de operación, y otros parámetros de interés.

Para ello, voy a partir de un autobús real propulsado por gas natural comprimido que

está en funcionamiento hoy en día, y tomando como base éste, voy a reemplazar las partes diferenciales del mismo para que sea uno eléctrico.

El autobús que voy a tomar como base para realizar mis cálculos es el BredaMenaribus Vivacity+ C CNG, ver Fig 1.11. Si nos fijamos en los tamaños medios de los autobuses de GNC y de los eléctricos en el mundo, vemos que, debido a las desventajas de maduración de la tecnología eléctrica, éstos son más pequeños que los de GNC, por lo que he escogido un autobús de dimensiones medias ya que es el segmento de tamaño que más comparten estas dos tecnologías. Las características de este autobús aparecen en la TABLA 2.1.

TABLA 2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL
BREDAMENARINIBUS VIVACITY+ C CNG

Característica	Valor
Nº de asientos / Capacidad total	11 / 53
Longitud	7,995 m
Anchura	2,35 m
Altura desde el fondo	2,715 m
Peso neto / Peso máx.	9100 kg / 13000 kg
Potencia máx. motor	228 CV (170 kW)
Par máx. motor	808 Nm
Eficiencia motor	36,7 %
Fuentes: [43] y [12]	

Según la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de septiembre de 2007, este vehículo pertenece a la categoría M3, ya que es un vehículo diseñado para el transporte de pasajeros, cuya capacidad es mayor de ocho personas y su masa máxima supera las cinco toneladas.

Para el autobús eléctrico voy a utilizar las mismas medidas que en el autobús de gas natural y el mismo peso, ya que aunque las baterías tienen una baja densidad energética, las bombonas de GNC tienen paredes gruesas para soportar las altas presiones del gas, por lo que también son muy pesadas. De esta manera, podemos asegurar que la autonomía se verá afectada en detrimento del autobús eléctrico, pero seguirá siendo suficiente para acometer las operaciones que realizan este tipo de autobuses en zonas urbanas. Por otra parte, para que tengan un desempeño muy similar, voy a utilizar un motor eléctrico con el mismo par que el de GNC, he elegido como modelo el motor eléctrico que lleva el nuevo autobús Irizar i4 [44]. Todas estas características anteriormente nombradas, aparecen esquematizadas en la TABLA 2.2.

TABLA 2.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN AUTOBÚS ELÉCTRICO HOMÓLOGO

Característica	Valor
Nº de asientos / Capacidad total	11 / 53
Longitud	7,995 m
Anchura	2,35 m
Altura desde el fondo	2,715 m
Peso neto / Peso máx.	9100 kg / 13000 kg
Potencia máx. motor	150 CV (110 kW)
Par máx. motor	800 Nm
Eficiencia motor	95 %
Fuentes: [44], [15] y elaboración propia.	

2.2.1. Simulación del comportamiento

Para llevar a cabo los cálculos voy a utilizar un programa de simulación de vehículos llamado FASTSim cuyas siglas en inglés significan Future Automotive System Technology Simulator. Es una herramienta de simulación que usa como entorno de trabajo Microsoft Excel y está disponible de manera gratuita y de libre acceso al público. Se puede descargar en la web del organismo gubernamental de EEUU, la National Renewable Energy Laboratory [45].

La simulación numérica es una representación de la realidad mediante un modelo, que se rige a través de relaciones matemáticas y lógicas que describen el comportamiento y la estructura de la realidad que representa.

Fuerzas sobre el vehículo

Para poder entender como funciona este simulador voy a exponer las principales ecuaciones que describen el comportamiento de un autobús. Para ello debemos ver las principales fuerzas que actúan sobre el vehículo.

En el eje longitudinal, que es el más relevante de cara a los objetivos de este trabajo, existen varias fuerzas actuando sobre el vehículo cuando éste está circulando. La principal fuerza existente es la fuerza de tracción, que se produce en las ruedas motrices. Ésta es generada en el motor, y mediante el par, se transmite a las ruedas con el sistema de transmisión, y debido a la fricción de éstas con el suelo, se provoca esta fuerza siendo favorable al avance del vehículo.

Por lo tanto, esta fuerza depende de las características del motor, del sistema de transmisión y de las ruedas, principalmente. En la ecuación (2.5) podemos ver la fuerza de tracción en las ruedas, siendo T_e el par motor, N_t la relación de la marcha t de la caja de cambios, N_f la relación de desmultiplicación del grupo fijo, η_{tf} el rendimiento del sistema

de transmisión y r_c el radio bajo carga del neumático [46].

$$F_d = \frac{T_e N_t N_f}{r_c} \eta_{tf} \quad (2.5)$$

Después, existen una serie de fuerzas que generalmente son de oposición o de resistencia al movimiento del vehículo. Estas fuerzas de resistencia son las que aparecen en la siguiente enumeración. Además, para una mejor comprensión, en la Fig. 2.8. aparecen esquematizadas estas fuerzas principales actuando sobre un vehículo en pendiente.

- La resistencia aerodinámica al avance, que es la debida a las interacciones entre el vehículo y el flujo de aire que lo rodea. Ésta depende de la densidad del aire, el coeficiente de fricción aerodinámico, el área frontal del vehículo y la velocidad a la que se mueva el mismo, ver ecuación (2.6).

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^2 \quad (2.6)$$

- La resistencia a la rodadura, que es causada por las interacciones entre las partes del vehículo que están en contacto con el suelo, las ruedas, y la propia superficie sobre la que circula. Ésta depende del coeficiente de resistencia a la rodadura y del peso del vehículo, ver ecuación (2.7).

$$R_r = f_r P \quad (2.7)$$

- La resistencia gravitatoria, que es la componente del peso paralela a la superficie de rodadura, por lo que en este caso no siempre será una fuerza de oposición al movimiento del vehículo, ya que depende de la orientación de la pendiente. Esta fuerza aparece únicamente en pendiente, y depende del ángulo de la misma y del peso del vehículo, ver ecuación (2.8).

$$R_g = \text{sen}(\alpha) P \quad (2.8)$$

Una vez que tenemos las fuerzas que actúan sobre el eje longitudinal, en la dirección del avance del vehículo, podemos realizar un equilibrio de fuerzas mediante la segunda ley de Newton. De esta manera, sabemos que la fuerza resultante o fuerza de avance, que es igual a la masa por la aceleración del vehículo en ese eje longitudinal, es el sumatorio de fuerzas que actúan sobre éste, ver ecuación (2.9) y si lo desarrollamos, ver ecuación (2.10).

$$F_T = F_d - F_a - R_r - R_g = m a_x \quad (2.9)$$

$$F_T = \frac{T_e N_t N_f}{r_c} \eta_{tf} - \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^2 - f_r P - \text{sen}(\alpha) P \quad (2.10)$$

Por lo tanto, una vez conocidas las expresiones que rigen el comportamiento de los vehículos, podemos saber como funciona el programa de simulación en el que voy a calcular la energía necesaria para realizar varios ciclos de conducción.

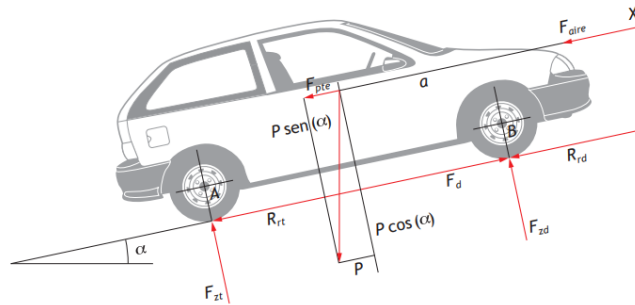


Fig. 2.8. Fuerzas principales que actúan sobre un vehículo en pendiente. [47]

Ciclos de conducción

Para poder simular el comportamiento real del autobús, es necesario tener un perfil que nos indique las velocidades que tiene el mismo en cada momento durante un recorrido determinado. Estos perfiles de velocidad intentan describir el comportamiento real de un vehículo en unas condiciones de conducción características.

Los ciclos de conducción son imprescindibles para la homologación de vehículos en todo el mundo, ya que, gracias a ellos podemos calcular el consumo, las emisiones o la autonomía que estos vehículos pueden tener en varios contextos, que se estandarizan en urbano, interurbano y mixto. Estas condiciones son más aproximadas al tráfico real de lo que podría proporcionar un circuito, ya que los vehículos sin matricular, sin homologar, no pueden circular por la vía pública hasta que hayan pasado por ese proceso. Aunque para este cometido se obtienen los resultados de manera experimental, con bancos de pruebas, y no mediante simulación.

Para tener unos resultados que me aporten más información acerca del comportamiento de los autobuses, voy a realizar los cálculos para tres ciclos diferentes. Debido a que las principales ventajas de este tipo de autobuses aparecen, como ya expliqué anteriormente, en zonas urbanas, estos ciclos estarán enfocados a este desempeño, aunque en alguno aparezcan partes que se puedan considerar más como una conducción típica interurbana.

Los ciclos que utilizaré son los que he considerado más relevantes, siguiendo el criterio expuesto con anterioridad, dentro de los que vienen disponibles en el programa de simulación, y son los que vienen descritos a continuación.

- Orange County Bus Cycle (OC BUS). Fue desarrollado por la West Virginia University (WVU), y se basaron en los patrones de conducción de diferentes autobuses urbanos que transitan en Los Ángeles, en la zona de California. En la Fig. 2.9 viene representado el ciclo, en el que podemos observar una gran cantidad de paradas que

pueden representar tanto la recogida y deposición de pasajeros como retenciones en el tráfico o semáforos.

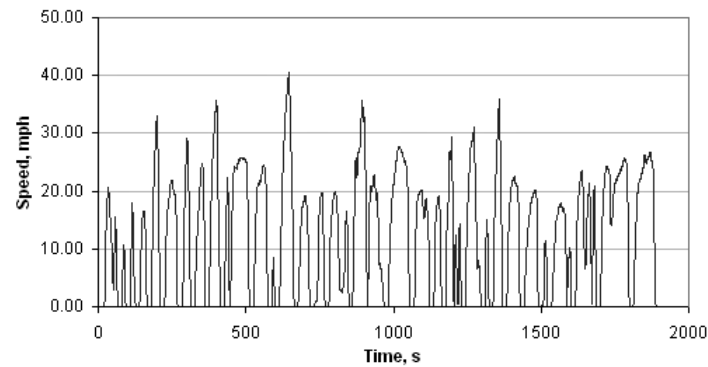


Fig. 2.9. Ciclo Orange County Bus (OC BUS). [48]

- EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) for Heavy-Duty Vehicles. Es un ciclo realizado por la EPA, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EEUU, diseñado para vehículos pesados. Está basado en otro ciclo, el FTP Cycle, y conformado como test para la regulación de emisiones en vehículos pesados en EEUU. Tal y como aparece en la Fig. 2.10, este ciclo tiene la estructura de una conducción mixta, ya que aparecen partes del mismo a unas velocidades bajas y otras partes a velocidades propias de carreteras más grandes, llegando a una velocidad máxima de 93,3 Kkm/h.

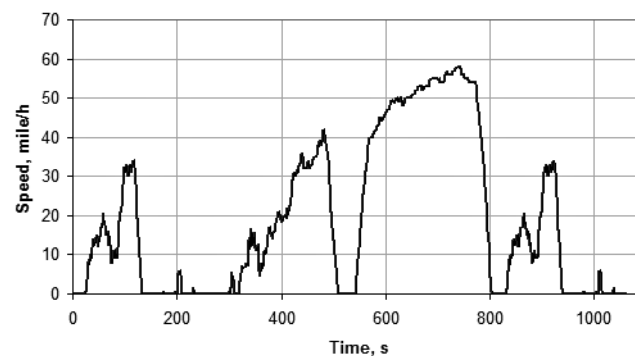


Fig. 2.10. Ciclo Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) para vehículos pesados de la EPA. [49]

- EPA New York City Cycle (NYCC). Este ciclo fue creado también por la EPA, como el anterior, y está diseñado para vehículos ligeros. Debido a que este ciclo intenta representar el tráfico de Nueva York, aparece, como vemos en la Fig. 2.11, con bajas velocidades y frecuentes paradas, por lo que, aunque yo lo voy a utilizar para un autobús, que es un vehículo pesado, puede servir para comprobar como es el desempeño de éste en un núcleo totalmente urbano.

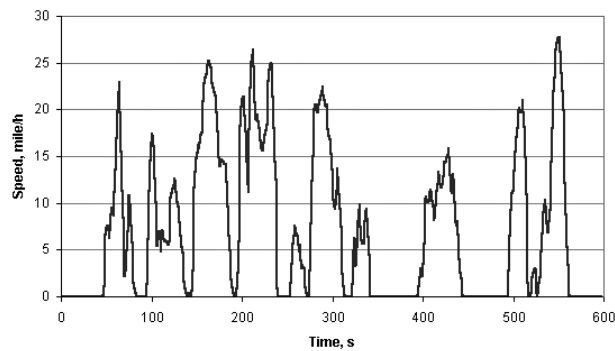


Fig. 2.11. Ciclo New York City (NYCC) de la EPA [50]

Parámetros del programa

Una vez que tenemos establecido el caso de estudio y el modelo de cálculo, solo falta introducir los parámetros en el programa para que calcule los datos que estoy interesado en conocer.

De esta manera, lo primero que tengo que hacer es introducir los valores de las características del vehículo en la interfaz que aparece en la Fig. 2.12. Voy a empezar introduciendo los datos del autobús de GNC. El primer parámetro que aparece nos permite seleccionar un vehículo prototípico para que muchos datos que no conocemos los tome de éste. El más próximo a nuestro autobús es el Regional Delivery Class 8 Truck, que aunque es un camión, es lo más parecido a un autobús que tenemos. Después, entramos ya en las características del vehículo, empezando por el tipo de vehículo que queremos simular, siendo Conv, de combustibles convencionales, la opción a elegir en este caso. Después, introduciré el coeficiente de fricción aerodinámica, que para un autobús de perfiles redondeados es de 0,36 [30]. También aparece como tercer parámetro el área frontal, que te permite calcularlas en el programa mediante las medidas de la cara frontal del autobús. El cuarto parámetro es el peso del autobús, excluyendo el peso del motor y el sistema de transmisión. Después, aparecen una serie de parámetros, que como no son conocidos, dejaré los que vienen por defecto, ya que no varían mucho al ser parámetros secundarios. Por último, aparece la masa con la que realizaré el test, que vamos a suponer que es la máxima.

<input type="button" value="Delete"/> <input type="button" value="Save as"/> <input type="button" value="Reload"/> <input type="button" value="Save"/>		Regional Delivery Class 8 Truck ▼
		<input type="button" value="Light-duty vehicle import wizard"/>
Fuel economy test procedure		Conv 1
Drag coefficient		0,340
Frontal area (m²)	Calculator	57,434
Vehicle glider mass (kg)	Calculator	8100
Vehicle center of gravity height (m)		0,53
Drive axle weight fraction		0,59
Wheel base (m)		2,7536
Cargo mass (kg)		136
Vehicle override test mass (kg)		13000

Fig. 2.12. Parámetros del programa FastSim. Características del vehículo. Autobús GNC.

Después, viene un apartado relativo al combustible y su almacenamiento, denominado fuel storage, en el que hay que añadir la capacidad de los tanques de gas y el poder calorífico del mismo. He dispuesto unos tanques de 75 kg de CNG, ya que ésta es la capacidad que suelen tener los vehículos de este tamaño.

Todos estos datos vienen representados en la Fig. 2.13, pero además, aparecen también los relativos al motor, en el apartado llamado fuel converter. En éste, aparecen la potencia del motor o el tipo de motor, que viene como SI, de spark ignition, es decir de encendido por chispa, ciclo Otto. También se muestra un porcentaje de mejora de la eficiencia del 4 %, ya que el rendimiento medio tiene que estar en torno a los 36,7 % [12]. Incluyo también el peso del motor [34], y dejo los valores por defecto en el resto de parámetros, ya que los desconozco y son similares y de menor relevancia.



Fuel storage 	
Fuel storage power (kW)	5000
Fuel storage time to full power (s)	1
Fuel storage energy (kWh)	1042,50
Fuel and fuel storage mass (kWh/kg)	13,90
Fuel converter 	
Fuel converter power (kW)	170
Fuel converter efficiency type	Show/hide chart SI
Efficiency improvement	4,0%
Fuel converter time to full power (s)	6
Fuel converter base mass (kg)	530
Fuel converter specific power (kW/kg)	0,64
Minimum Engine-on Time (s)	30,00

Fig. 2.13. Parámetros del programa FastSim. Características del combustible y el motor. Autobús GNC.

Hay un último apartado referente a las ruedas, ver Fig. 2.14, en la que dejo los parámetro por defecto ya que son valores que varían muy poco y no son conocidos.


Wheel 	
Wheel inertia (one wheel) (kg*m^2)	0,815
Number of wheels	4
Rolling resistance coefficient	0,009
Tire radius (m)	Calculator 0,506
Wheel coefficient of friction	0,7

Fig. 2.14. Parámetros del programa FastSim. Características de las ruedas. Autobús GNC.

Finalmente falta seleccionar los ciclos de conducción que se van a utilizar, que son los descritos en la parte de ciclos de conducción, e inicializar el programa. Ésto, como se ve en la Fig. 2.15, se hace seleccionándolos de la lista de la izquierda, en el apartado de additional drive cycles, y añadiéndolos a la derecha. Para inicializar el programa pulsamos el boton de run.

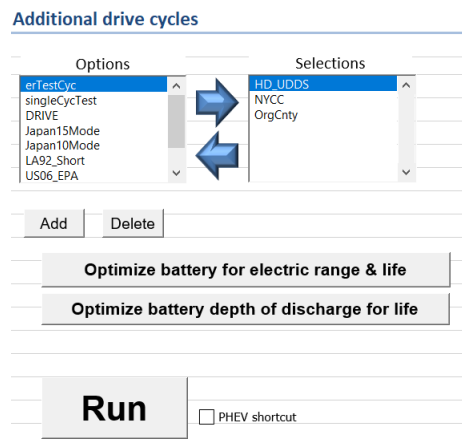


Fig. 2.15. Parámetros del programa FastSim. Selección de ciclos e inicialización.

Una vez que el programa termina de calcular, solo falta recoger e interpretar los resultados. Pero antes voy a introducir los parámetros del vehículo eléctrico y dejaré los resultados de ambos para el siguiente apartado.

De la misma manera que con el autobús de gas, en la Fig. 2.16. aparecen las características propias del vehículo. Para los datos de este segmento, he tomado como modelo el mismo que para el autobús de GNC, excepto para los parámetros eléctricos, que he tomado como modelo el Tesla S60, ya que tiene baterías de ion litio que son las que yo voy a utilizar para el autobús. Por tanto, con la excepción del primer parámetro, que es EV, de electric vehicle, que hace referencia a que es un vehículo completamente eléctrico, los demás son los mismos que para el caso anterior.

Delete	Save as	Reload	Save	2016 TESLA Model S60 2wD
Vehicle		Light-duty vehicle import wizard		
Fuel economy test procedure		EV		4
Drag coefficient				0,34
Frontal area (m²)	Calculator			57,343
Vehicle glider mass (kg)	Calculator			8100
Vehicle center of gravity height (m)				0,53
Drive axle weight fraction				0,59
Wheel base (m)				2,7536
Cargo mass (kg)				136
Vehicle override test mass (kg)				13000

Fig. 2.16. Parámetros del programa FastSim. Características del vehículo. Autobús eléctrico.

El siguiente apartado varía con respecto al vehículo de gas, ya que aparecen, ver Fig. 2.17, unos segmentos que son motor y traction battery, que hacen referencia a las características del motor y de las baterías, respectivamente. En la primera sección, he rellenado los valores de la potencia del motor y de la eficiencia del mismo, los demás valores son los predeterminados. Para la sección de las baterías, he implementado una capacidad de 175 kWh de baterías, ya que es la más usual para este tipo de vehículos, los demás parámetros son propios de las baterías de ion-litio, que vienen por defecto.

Motor		
Motor power (kW)		110
Motor peak efficiency	Show/hide chart	95%
Motor time to full power (s)		3
Motor controller mass (kg/kW)		0,833
Motor controller base mass (kg)		21,6
Traction battery		
Battery power (kW)		500,0
Battery energy (kWh)		175,0
Battery mass (kg/kWh)		8,0
Battery base mass (kg)		75,0
Battery round trip efficiency		97,0%
Battery life coefficient A (product)		110
Battery life coefficient B (power)		-0.6811

Fig. 2.17. Parámetros del programa FastSim. Características del motor y de las baterías. Autobús eléctrico.

Por último, tanto el apartado de las ruedas como el de selección de ciclos e inicialización de la simulación, son exactamente iguales a los del autobús de gas natural, por lo que coinciden con la Fig. 2.14 y la Fig 2.15, respectivamente.

Resultados

En esta parte voy a presentar y analizar los datos obtenidos en el programa después de haber realizado las simulaciones.

Lo primero que hay que analizar es la capacidad de los vehículos para realizar los ciclos, ya que, debido a que son autobuses diseñados para un entorno urbano y el análisis lo he realizado para la carga máxima de los mismos, sucede que no han sido capaces de llevar a cabo por completo algunos ciclos.

En la Fig. 2.18, está representado el perfil de velocidades del ciclo UDDS, en azul, y el que ha sido capaz de acometer el autobús de GNC, en verde. En la misma gráfica, se ve como es capaz de realizar el ciclo de manera correcta hasta que llega a la parte de mayor velocidad del ciclo, que llega hasta los 95 km/h, lo que es una velocidad típica de entornos interurbanos, donde solo es capaz de alcanzar los 75 km/h.

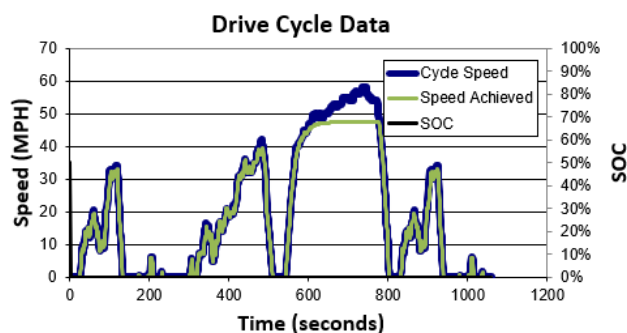


Fig. 2.18. Resultados del programa FastSim. Ciclo UDDS para vehículos pesados. Autobús GNC.

De la misma manera en la Fig. 2.19, aparece la misma gráfica, pero en este caso del autobús eléctrico. En azul, está representado el ciclo y en verde, lo alcanzado por el vehículo. En este caso, el autobús eléctrico ha sido capaz de alcanzar 70 km/h, aunque, el resto del ciclo lo ha realizado con normalidad.

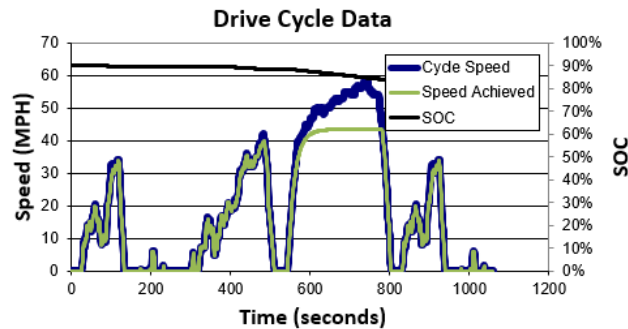


Fig. 2.19. Resultados del programa FastSim. Ciclo UDDS para vehículos pesados. Autobús eléctrico.

Puede parecer que 75-70 km/h es poca velocidad para un vehículo de este tipo, pero hay que tener en cuenta que está diseñado para circular en entornos urbanos, donde sabemos que la velocidad máxima permitida para autobuses en vías urbanas es de 50 km/h, en España. Y también, hay que tener en cuenta, que esta simulación está realizada para la carga máxima del vehículo que no será su carga de operación habitual, por lo que estos desempeños son suficientes para la operación normal de los autobuses.

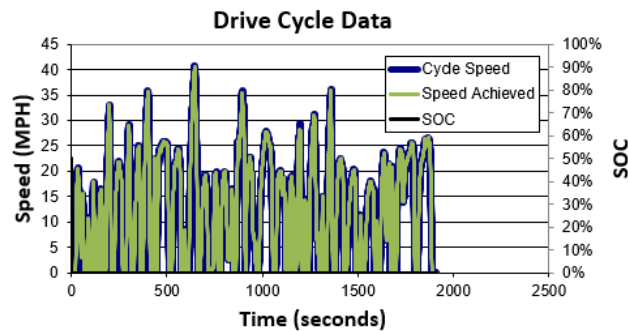


Fig. 2.20. Resultados del programa FastSim. Ciclo OC BUS. Autobús GNC.

Respecto a la afirmación que acabo de sostener, podemos observar su veracidad mediante la Fig. 2.20 y la Fig. 2.21. En éstas, se muestran los desempeños del autobús de gas y el autobús eléctrico respectivamente, en el ciclo de conducción Orange County Bus, que es el más apropiado para el tipo de operaciones para las que están diseñados estos autobuses. Los resultados muestran que ambos vehículos han podido realizar el ciclo con pocas dificultades. Aunque en este caso, como veremos más adelante, la desviación máxima de velocidad, frente al ciclo, ha sido por parte del autobús eléctrico, aunque es una desviación pequeña.

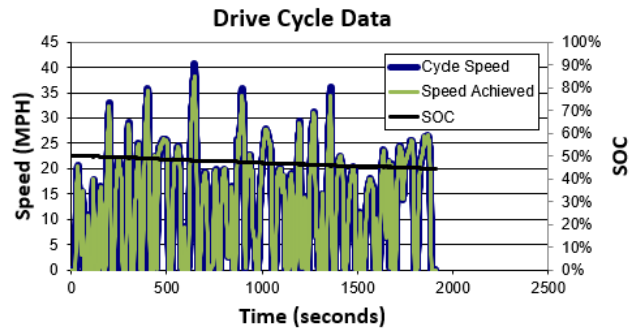


Fig. 2.21. Resultados del programa FastSim. Ciclo OC BUS. Autobús eléctrico.

Ahora vamos a ver el último ciclo, el ciclo NYCC. Como ya expliqué anteriormente, éste es un ciclo para vehículos ligeros, por lo que ya esperaba que no fueran capaces de realizarlo totalmente, sobre todo en partes que demandasen altas aceleraciones, ya que los vehículos pesados sufren en este tipo de actuaciones.

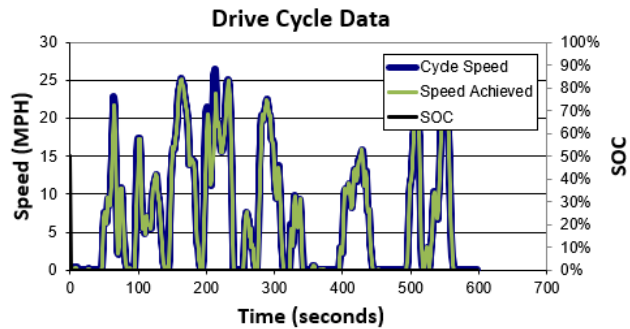


Fig. 2.22. Resultados del programa FastSim. Ciclo NYCC. Autobús GNC.

Aún así, como se puede apreciar en la Fig. 2.22 y la Fig. 2.23, tanto el vehículo de GNC como el eléctrico han sido capaces de realizar el ciclo en su mayor parte. Con unas desviaciones máximas de velocidad respecto del ciclo de 15 km/h y 9 km/h, respectivamente, ver Fig. 2.24 y Fig. 2.25.

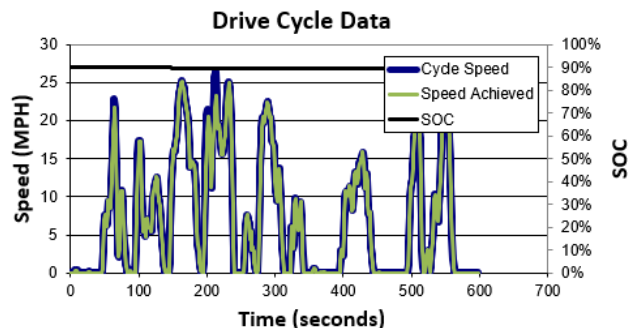



Fig. 2.23. Resultados del programa FastSim. Ciclo NYCC. Autobús eléctrico.

A continuación, voy a exponer la tabla de resultados otorgada por el programa para cada caso, donde vienen reflejados en este orden: el nombre del ciclo, la desviación máxi-


ma de velocidad, el uso de batería y combustible (útil para vehículos híbridos), consumo de combustible, consumo de electricidad, distancia recorrida por ciclo, eficiencia media del motor eléctrico, y eficiencia media del motor de combustión.



Additional cycle results			
Drive cycle name	HD_UDDS	NYCC	OrgCnty
Max trace miss (mph)	10,6	9,1	1,7
Battery/Fuel energy ratio	0,000	0,000	0,000
Fuel economy (mpgge)	3,36	2,92	3,9
DC electric efficiency (kWh/mile)	0,000	0,000	0,000
Distance (miles)	5,2	1,1	6,5
Motor average output efficiency	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Fuel converter average efficiency	35%	35%	37%

Fig. 2.24. Resultados generales del programa FastSim. Autobús GNC.

En la Fig 2.24 aparecen los datos del autobús de gas natural, por lo que los parámetros propios del vehículo eléctrico aparecen en blanco, y el del uso de batería y combustible aparece con un cero, que significa que solo usa combustible. En la Fig. 2.25 aparecen los resultados del autobús eléctrico, donde por el contrario, son los parámetros propios de los autobuses de combustión los que aparecen en blanco, y el del uso de batería y combustible aparece con un uno, que representa que solo usa baterías.



Additional cycle results			
Drive cycle name	HD_UDDS	NYCC	OrgCnty
Max trace miss (mph)	14,6	5,7	2,9
Battery/Fuel energy ratio	1,000	1,000	1,000
Fuel economy (mpgge)	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
DC electric efficiency (kWh/mile)	2,217	1,429	1,486
Distance (miles)	5,0	1,2	6,5
Motor average output efficiency	93%	94%	94%
Fuel converter average efficiency	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Fig. 2.25. Resultados generales del programa FastSim. Autobús eléctrico.

Lo primero que podemos observar de estos datos son las desviaciones máximas de velocidad en cada ciclo, y nos damos cuenta, que en los ciclos diseñados para vehículos pesados, el autobús de GNC obtiene ventaja media del 55 %, debido seguramente a su mayor potencia. Sin embargo, en el ciclo para vehículos ligeros, donde aparecen aceleraciones mayores, la ventaja la tiene el autobús eléctrico, debido a su inmediata entrega de par máximo.

El siguiente parámetro relevante es el consumo, el cual viene expresado en unidades distintas en cada caso, por lo que voy a pasar los dos valores a kWh/100km, que son unidades más comunes en Europa. Las unidades en las que se encuentra el vehículo de GNC son millas por galón de gasolina equivalente. Para cambiar las unidades voy a utilizar los valores de equivalencias que aparecen en el trabajo de un estudiante de la Universidad de Stanford [51], dedicado a este asunto. En la ecuación (2.11) aparece el factor de conversión que tendré que dividir por cada uno de los valores en mpgge. Estos valores aparecen en las ecuaciones (2.12), (2.13) y (2.14), donde además multiplico por cien para hallar el

valor por cada cien kilómetros.

$$\frac{1}{\text{mpgge}} = \frac{\text{gge}}{\text{milla}} \frac{2,57 \text{ kg CNG}}{1 \text{ gge}} \frac{1 \text{ milla}}{1,60934 \text{ km}} \frac{13,9 \text{ kWh}}{1 \text{ kg CNG}} = 22,197 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{3,36 \text{ mpgge}} = \frac{22,197 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}}{3,36} = 6,61 \text{ kWh/km} = 661 \text{ kWh/100km} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{2,92 \text{ mpgge}} = \frac{22,197 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}}{2,92} = 7,60 \text{ kWh/km} = 760 \text{ kWh/100km} \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{3,9 \text{ mpgge}} = \frac{22,197 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}}{3,9} = 5,69 \text{ kWh/km} = 569 \text{ kWh/100km} \quad (2.14)$$

Será más sencillo hallar los valores de consumo del vehículo eléctrico, ya que solo hay que pasar de millas a km, ver ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17).

$$2,217 \frac{\text{kWh}}{\text{milla}} \frac{1 \text{ milla}}{1,60934 \text{ km}} = 1,38 \text{ kWh/km} = 138 \text{ kWh/100km} \quad (2.15)$$

$$1,429 \frac{\text{kWh}}{\text{milla}} \frac{1 \text{ milla}}{1,60934 \text{ km}} = 0,89 \text{ kWh/km} = 89 \text{ kWh/100km} \quad (2.16)$$

$$1,486 \frac{\text{kWh}}{\text{milla}} \frac{1 \text{ milla}}{1,60934 \text{ km}} = 0,92 \text{ kWh/km} = 92 \text{ kWh/100km} \quad (2.17)$$

Para visualizar de manera más sencilla los valores de consumo de cada vehículo por ciclo voy a presentarlos en la TABLA 2.3.

TABLA 2.3. CONSUMOS DE LOS DOS MODELOS DE AUTOBÚS
EN LOS DIFERENTES CICLOS DE CONDUCCIÓN

	UDDS	NYCC	OC BUS
Consumo GNC	661	760	569
Consumo EV	138	89	92
Todos los valores en kWh/100km.			
Fuentes: Elaboración propia.			

La primera apreciación acerca de los datos de consumo, es que existe una diferencia notable a favor del vehículo eléctrico en cuanto a la energía que gastan cada uno. A partir de estos datos, se obtiene que en promedio el autobús de GNC consume seis veces y media más energía que el eléctrico.

También se puede ver como la ventaja del autobús eléctrico, en cuanto a consumo energético se refiere, es mayor cuanto más parecido a un entorno urbano es el ciclo, cuanto

más baja es la velocidad media del ciclo, y va disminuyendo según nos acercamos a velocidades mayores, a entornos más interurbanos. Esto es debido a la diferencia entre la entrega de par y potencia de cada motor. En los entornos urbanos hay más aceleraciones a bajas cargas del motor, por lo que el eléctrico está trabajando donde el par del motor eléctrico es máximo, por el contrario, el motor de GNC trabaja zonas donde el par va oscilando, siendo solamente máximo en momentos puntuales. Por otra parte, en zonas interurbanas son más comunes las conducciones a velocidad constante con una carga media o alta del motor, pero con pocas aceleraciones, de esta manera, el par del vehículo de gas se mantiene alto y la potencia es cercana a la máxima. Sin embargo, en el vehículo eléctrico cuando estamos en zonas de potencia máxima, el par disminuye bastante, por lo que su desempeño a velocidades que exigen máxima potencia se ve disminuido.

Para comprobar la validez de los datos obtenidos, voy a compararlos con datos de consumo de los autobuses de la EMT [52]. En este informe del 2016, podemos ver como el consumo de los autobuses propulsados por gas natural fue de 734,63 kWh/100km. Hay que tener en cuenta que en la flota de autobuses de la EMT la mayoría de los autobuses de GNC son más grandes que el que yo estoy midiendo. Por lo que comparando este consumo con el producido en el ciclo más parecido al que realizan estos autobuses, que sería el OC BUS, se asemeja bastante. También aparece el dato del consumo de los autobuses eléctricos, que es de 88,12 kWh/100km, y sabiendo que el modelo de autobús eléctrico del que disponen en la EMT es ligeramente más pequeño al que yo he utilizado, podemos decir que el valor de consumo de éste también se aproxima bastante a la realidad.

Por otro lado, y basándome en los datos de consumo obtenidos anteriormente, voy a calcular las autonomías que tendrían estos vehículos. Estando éstos equipados con las características que dispuse en los parámetros para cada autobús (1042,5 kWh de CNG, 75 kg, y 175KWh de baterías ion-litio), que coinciden con las más utilizadas para cada tipo, y posteriormente disponerlas en la TABLA 2.4.

TABLA 2.4. AUTONOMÍAS DE LOS DOS MODELOS DE AUTOBÚS EN LOS DIFERENTES CICLOS DE CONDUCCIÓN

	UDDS	NYCC	OC BUS
Autonomía GNC	158	137	183
Autonomía EV	127	197	190
Todos los valores en km.			
Fuentes: Elaboración propia.			

En estos datos, vemos que la diferencia tan grande que había en la parte de los consumos se ha visto reducida, llegando incluso el vehículo de CNG a superar al eléctrico. Esto es debido a que, como ya expliqué en el apartado de tecnologías involucradas, la densidad energética del sistema de almacenaje del CNG es mayor que la de las baterías eléctricas. Por lo que aumentar la autonomía en los vehículos de gas conlleva un menor impacto en el consumo que aumentarla en los eléctricos.

De la misma manera que antes, se aprecia como las diferencias de autonomía para el ciclo más representativo, que sería el OC BUS, son muy similares. Ya que poseen una autonomía de 183 km y 190 km, estos autobuses serían capaces de recorrer, sin necesidad de repostar durante la jornada, la media de kilómetricos que recorren al día los autobuses de la EMT [52], que en 2016 fue de 176 km.

También podemos ver en la Fig. 2.25 y en la Fig. 2.24, las distancias recorridas en cada ciclo por ambos autobuses, así como la eficiencia media de los motores, donde podemos comprobar que la eléctrica ronda el 94 % frente a la de Gas que se acerca a los 37 %. Estos valores son los mismos que hemos establecido en las características de los vehículos.

2.2.2. Estimación de costes

A la hora de realizar un análisis en ingeniería es imprescindible calcular los costes en los que incurres cuando llevas a cabo un proyecto, ya que éste es un factor altamente limitante, por motivos obvios. Por esto, voy a estimar el coste que supondría la adquisición y operación de los autobuses para sus ciclos de vida medios, para saber cual de los dos sería más rentable.

Para ello voy a utilizar el método de cálculo de inversiones del Valor Actual Neto, el VAN. Este criterio de inversión permite calcular el valor presente de un conjunto de movimientos de caja futuros generados por esa inversión. De esta manera, sabiendo el valor inicial de cada vehículo y estableciendo los costes anuales en los que se incurre por la operación de los mismos, podemos saber cual de los dos autobuses es más rentable.

Los valores de adquisición los he obtenido extrapolando otros valores conocidos de autobuses similares. El coste del autobús de GNC lo voy a aproximar como un 34 % menor al precio de un autobús conocido de tamaño y potencia 34 % menores, el MAN Lion's City CNG con un precio de 285.000 €[53], luego el valor de adquisición de nuestro vehículo será de unos 216.600 €. Para el caso del autobús eléctrico, vamos a extrapolar su precio a partir de los precios conocidos de dos autobuses, uno superior y uno inferior en una magnitud similar, el Tecnobus Gulliver, que es un minibus, de valor 240.000 €[54] y el Irizar i2e, de valor 400.000 €[55], que es un autobús urbano de mayores dimensiones. Por lo tanto, puedo hacer una media de los dos valores para estimar su valor de adquisición, que resulta de 320.000 €. Esta diferencia de valor de adquisición del autobús eléctrico se debe en gran medida al gran coste que suponen las baterías en este tipo de vehículo, que todavía siguen siendo caras en su producción.

De esta manera, y tomando como funcionamiento normal, el recorrido diario de 176 km, obtenemos una operación anual de 64.240 km. Sabemos además, que en España, el precio de las energías es de 0,88 €/kg, que es 0,063 €/kWh, el del CNG [56], y de 0,14122 €/kWh el de la electricidad [57]. Hay que tener en cuenta también que el periodo máximo de amortización de un autobús son 14 años, y fijando el coste de oportunidad en 1,96 %, basado en la inflación media en España en 2017 [58].

Para realizar el cálculo, me voy a basar en el consumo que han tenido ambos autobuses en el ciclo OC BUS, ya que es el más similar a la operación normal de los mismos. En las ecuaciones (2.18) y (2.19) vienen reflejados los cálculos del valor actual neto para el caso del autobús de GNC y el eléctrico, respectivamente.

$$216600 \text{ €} + (0,063 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} 5,69 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} 64240 \text{ km}) \sum_{i=1}^{14} \frac{1}{(1,0196)^i} = 496170,49 \text{ €} \quad (2.18)$$

$$320000 \text{ €} + (0,14122 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} 0,92 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} 64240 \text{ km}) \sum_{i=1}^{14} \frac{1}{(1,0196)^i} = 421326,38 \text{ €} \quad (2.19)$$

Estos resultados nos muestran que, para las condiciones seleccionadas, el autobús eléctrico es más rentable. También he calculado que es necesario que transcurran siete años y medio aproximadamente para que el autobús eléctrico empiece a ser más rentable que el autobús de gas natural, y como sabemos que la vida útil de estos autobuses es de entre 14 y 16 años podemos decir que el autobús eléctrico es aproximadamente un 18 % más rentable.

2.3. Propuesta de mejora

Una vez conocido el funcionamiento y desempeño de estos modelos de autobuses, puedo pasar a abordar otro de los objetivos que me propongo en este trabajo. Este objetivo es plantear un sistema para mejorar el rendimiento energético de estos autobuses.

Mi propuesta consiste, de manera fundamental, en instalar en la parte superior del vehículo paneles solares fotovoltaicos. Ésta no es una idea nueva, ya que se llevan instalando paneles solares en vehículos desde los años noventa. Pero no empezaron a comercializarse hasta más adelante, y de manera anecdótica, debido al bajo nivel de desarrollo de esta tecnología para su uso en vehículos. También es cierto, que esto está cambiando, y que en los últimos años han empezado a verse vehículos de este tipo más a menudo. En China, que es uno de los principales productores y demandantes mundiales de paneles solares [59], han empezado a producir cantidades significativas de autobuses de este tipo, como el de la Fig. 2.26, que es un autobús eléctrico fabricado por una empresa de este país, que dispone de paneles solares en su techo.



Fig. 2.26. Autobús eléctrico BYD con paneles solares fotovoltaicos en el techo. [60]

Para poder comprender si este sistema cumple su propósito, y de que manera lo hace, es necesario explicar como funciona esta tecnología y calcular un caso concreto que nos permita entender la eficacia y magnitud que alcanza.

Por todo esto, comenzaré explicando el funcionamiento de estos paneles solares y los fundamentos físicos en los que se basa.

2.3.1. Fundamentos de los paneles solares fotovoltaicos

Los paneles solares fotovoltaicos son estructuras que transforman la energía de la luz del sol en energía eléctrica. Están formados por un grupo de células o celdas fotovoltaicas, que son dispositivos electrónicos compuestos de un material en el que se produce el efecto fotoeléctrico, asociadas eléctricamente.

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno físico que consiste en la emisión de electrones por parte de un material, al actuar sobre él una radiación electromagnética. Fue descubierto por Heinrich Herz en 1887, aunque no sería hasta 1905 cuando aparece la explicación teórica de éste por parte de Albert Einstein.

De esta manera, la expresión que describe el funcionamiento de este fenómeno la he dispuesto en la ecuación (2.20), donde la energía del fotón tiene que ser igual al trabajo de extracción, energía mínima para extraer un electrón de un sólido, más la energía cinética de ese electrón. Siendo h la constante de Plank, f la frecuencia de los fotones, f_0 la frecuencia umbral de los mismos para que se produzca el efecto fotoeléctrico, m la masa del electrón y v_m la velocidad media de éstos.

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}mv_m^2 \quad (2.20)$$

Para aprovechar esa energía cinética de los electrones emitidos hay que establecer un circuito cerrado para que se cree una corriente eléctrica. Si no cerrásemos este circuito, el elemento en el que se produce el efecto fotoeléctrico perdería material, debido a la emisión de electrones, por lo que tienen que ser repoblados continuamente. Para poder

hacer esto, se utilizan en las células fotovoltaicas materiales semiconductores tipo p-n que permiten la difusión de los electrones a través del mismo, moviéndose por los huecos generados en la emisión de los electrones. De esta manera, se genera una diferencia de potencial en la célula, lo que produce a su vez una corriente eléctrica susceptible de ser aprovechada.

2.3.2. Tipos de celdas fotovoltaicas

La gran mayoría de las celdas fotovoltaicas utilizan como su material principal el silicio, aunque también existen algunas de germanio y selenio. La principal diferencia entre las celdas es la estructura interna de este material, y por tanto, es éste el método de clasificación más habitual.

Voy a empezar por las células fotovoltaicas de silicio monocristalino, que tiene una disposición estructural en la que hay muy pocos defectos, ya que no posee fronteras de grano, haciendo que el material se encuentre en un solo cristal. Esto mejora, entre otros, la conductividad de la celda. También hace que la celda posea generalmente buenas eficiencias, de entorno al 16 %, aunque producir esta estructura cristalina es un proceso que genera elevados costes de fabricación, por lo que suele ser más cara.

También tenemos las celdas de silicio multicristalino, en las cuales, son varios cristales los que forman la estructura. De esta manera, se rebaja el coste de las celdas a cambio de reducir parcialmente el rendimiento de las mismas, cercano a 14 %.

De manera muy similar a éstas, existen las células de silicio policristalino, que posee igualmente una estructura de granos, aunque de un tamaño muy inferior a las de estructura multicristalina. El propósito de éste es el mismo que el anterior, reducir costes a cambio de rendimiento, que alcanza el 12 %. En la Fig. 2.27, se puede ver como estarían dispuestos los granos y la frontera de los mismos en una estructura de tipo policristalina.



Fig. 2.27. Estructura de silicio policristalino en una celda fotovoltaica. [61]

Por otra parte, tenemos las células fotovoltaicas de silicio amorfo, que son las de peor calidad. Fueron las primeras en fabricarse y se denominan así al presentar una estructura sin granos definidos, su rendimiento ronda el 8 %.

Para terminar, tenemos los denominados dispositivos híbridos. Gran cantidad de celdas modernas se producen mediante capas monocristalinas, entremezcladas con otras policristalinas a partir de técnicas de lámina delgada. Estas células han conseguido mejorar el rendimiento de las dispuestas de manera individual.

2.3.3. Curvas características

Para poder trabajar con estas placas de manera más cómoda, se tiende a representar en unas gráficas la corriente frente al voltaje. Esto es útil, ya que es posible, de esta manera, representar también en la misma gráfica el punto de máxima potencia. Este punto de máxima potencia, tal como aparece en la Fig. 2.28, se produce cuando el producto de la corriente y el voltaje, que es igual a la potencia eléctrica, según la propia definición de ésta, es máximo. Esta curva depende de dos factores, que son la temperatura de la celda y la irradiación, por lo que suele representarse un conjunto de curvas en los que se fija uno de los dos parámetros y se varía el otro, dando lugar a un abanico de curvas, como el que aparece en la Fig. 2.29.

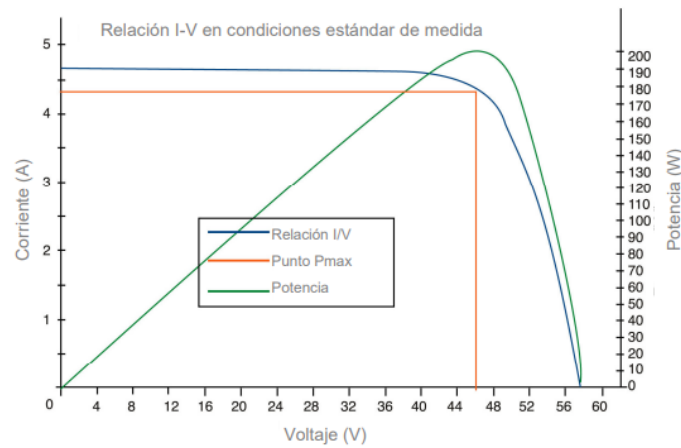


Fig. 2.28. Curva característica del módulo fotovoltaico IS-200/32 de Isofotón. [62]

De esta manera, podemos conocer el rendimiento de la celda de una manera sencilla, ya que una vez obtenida la potencia eléctrica de las curvas, dado que el área de la placa y la irradiación son factores conocidos, podemos obtener el rendimiento. Éste, por definición, es la potencia eléctrica generada entre la potencia solar captada por la placa, ver ecuación (2.21), donde P_{elec} es la potencia eléctrica, I_{solar} es la irradiación solar y A es el área de la placa.

$$\eta = \frac{P_{elec}}{I_{solar} A} \quad (2.21)$$

Por lo tanto, y como hemos dicho antes, ya que en estas curvas características se fija uno de los dos parámetros, la potencia variará dependiendo solamente del que no hayamos

fijado. Sin embargo, el rendimiento solo se ve afectado por uno de estos dos parámetros, la temperatura de la celda.

Cuando fijamos dicha temperatura y variamos la irradiación, como este termino afecta tanto a la parte de la potencia eléctrica, debido al efecto fotoeléctrico, como a la de la potencia solar, ya que aparece directamente en la expresión, se anula y no repercute en el rendimiento. Pero no ocurre igual cuando fijamos la irradiación y variamos la temperatura de la celda, porque al hacerlo solo se ve afectado el término de la potencia eléctrica, ya que la resistencia eléctrica varía con la temperatura. Por ello, el rendimiento de la placa se ve afectado por la temperatura de la celda, pero no por la irradiación, por lo que es más cómodo usar la curvas características que fijan la irradiación, como yo haré en el siguiente apartado.

Por otra parte, experimentalmente se obtiene una expresión para la temperatura de la celda, ver ecuación (2.22), en la que T_{celda} es la temperatura de la celda, T_{amb} es la temperatura ambiente, I_s es la irradiación solar, y T_{nom} es la temperatura nominal.

$$T_{celda} = T_{amb} + I_s \frac{T_{nom} - 20}{800} \quad (2.22)$$

De esta manera, teniendo las curvas características y utilizando las expresiones anteriores, puedo pasar a realizar un caso concreto.

2.3.4. Caso propuesto

Para mi propuesta, debido a las ventajas de rendimiento que supone, como ya hemos visto en el apartado de tipos de celdas fotovoltaicas, voy a escoger un módulo fotovoltaico con celdas de silicio monocristalino. En concreto, es el modelo IS-200/32 del fabricante de paneles solares Isofotón. A partir de una ficha técnica de este módulo [62], he obtenido las curvas características con una irradiación constante de 1.000 W/m^2 y variando la temperatura de diez en diez desde 15°C hasta los 55°C , representadas en la Fig. 2.29.

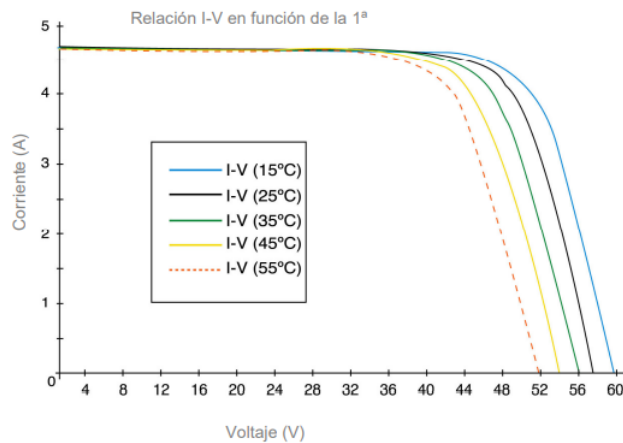


Fig. 2.29. Curva característica del módulo fotovoltaico IS-200/32 de Isofotón. Variando temperatura a irradiación constante. [62]

Utilizando esta gráfica, es posible obtener los valores de potencia máxima para cada temperatura, y de ésta manera calcular, mediante la ecuación del rendimiento, una expresión del mismo en función de la temperatura de la celda. Para ello, hay que obtener los valores de corriente y voltaje que hacen máxima la potencia para cada caso. Ésto lo haré a través de las curvas características. Después, usaré la definición de potencia eléctrica y la expresión del rendimiento, ecuación (2.21), para calcular los valores que aparecen como P_{elec} y η respectivamente. Para calcular el rendimiento necesito conocer el área del módulo fotovoltaico, que aparece en la ficha técnica del mismo [62], siendo de $1,665 m^2$. Para comparar y visualizar mejor los resultados, voy a mostrarlos en la TABLA 2.5 que se muestra a continuación.

TABLA 2.5. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO A DISTINTAS TEMPERATURAS

T^a (°C)	I (A)	V (V)	P_{elec} (W)	η (%)
55	4,30	40,0	172,00	10,33
45	4,33	41,6	180,13	10,82
35	4,37	44,0	192,28	11,55
25	4,43	45,3	200,68	12,05
15	4,44	46,0	204,24	12,27
Fuentes: [62] y elaboración propia.				

Como podemos ver, la potencia eléctrica aumenta de manera inversamente proporcional a la temperatura de la celda, y de la misma manera, como ya dijimos antes, el rendimiento lo hace también.

Para obtener la expresión general del rendimiento en función de las temperaturas voy a utilizar un modelo de regresión, con la ayuda de un programa de cálculo (Matlab), basado en los valores de rendimiento obtenidos. La curva que voy a utilizar para ajustar los puntos es un polinomio de segundo grado que se corresponde con la ecuación (2.23), que representa el rendimiento en función de la temperatura de la celda. En la Fig. 2.30 se pueden apreciar los puntos de rendimiento obtenidos, así como la curva polinómica que intenta ajustarse a éstos.

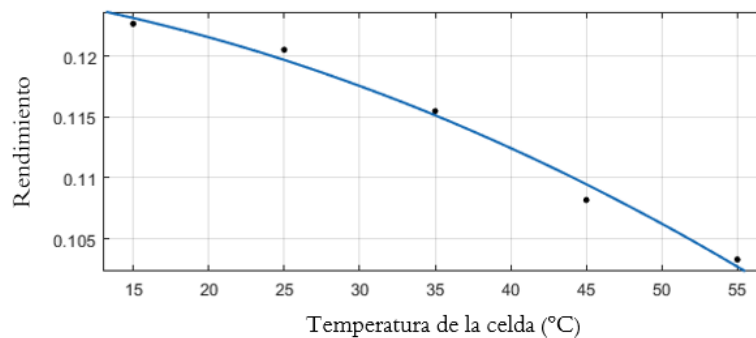


Fig. 2.30. Rendimiento de la celda en función de la temperatura de la misma. Regresión polinómica a partir de cinco puntos.

Utilizando ahora esta expresión y la ecuación (2.22), puedo obtener el rendimiento en función de la temperatura ambiente y de la irradiación, por lo que tomando los datos de estos dos parámetros en un lugar geográfico concreto, puedo llegar a calcular la potencia eléctrica que suministraría este módulo en el tejado del autobús mediante la ecuación (2.21), a partir del valor del rendimiento.

$$\eta(T_{celda}) = -5,53 \cdot 10^{-6} T_{celda}^2 - 1,236 \cdot 10^{-4} T_{celda} + 0,1262 \quad (2.23)$$

El siguiente paso, por tanto, es escoger una localización concreta donde realizar los cálculos. Dado que yo soy de Madrid, igual que he hecho al escoger un autobús de la EMT, voy a localizar mi vehículo en esta ciudad española.

Madrid se encuentra en el hemisferio norte, a cuarenta y un grados de latitud y muy cercano al meridiano cero. Esto hace que sea una ciudad que, según la clasificación climática de Köppen, posee un clima a caballo entre el semiárido frío y el clima mediterráneo, por lo que es un lugar con una gran cantidad de días soleados al año, lo que es una enorme ventaja para esta aplicación.

Los datos de temperaturas fueron tomados en Madrid en el año 2006 por el departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III, a la que pertenezco, y son los que aparecen representados en la siguiente gráfica, ver Fig. 2.31, donde figuran las temperaturas registradas por hora durante todo el año.

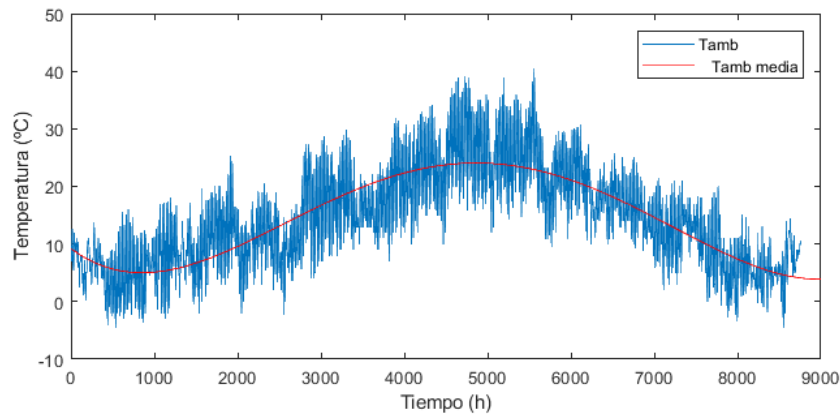


Fig. 2.31. Temperatura ambiente horaria en Madrid durante un año natural.

Viendo la gráfica, Fig 2.31, se puede apreciar que en la zona central es donde se producen las mayores temperaturas medias, ya que corresponde a los meses de verano, que son más calurosos, con unas temperaturas que rondan los treinta grados. Por otro lado, en las zonas de los extremos de la gráfica, las temperaturas son menores, ya que se corresponde con los meses de invierno, y rondan los siete grados. De la misma manera, puedo mostrar los datos de irradiación sobre la superficie horizontal en esta ciudad durante el mismo periodo, que han sido tomados en el mismo lugar que los de temperatura, mediante un conjunto de piranómetros, y son los que aparecen representados en la Fig. 2.32.

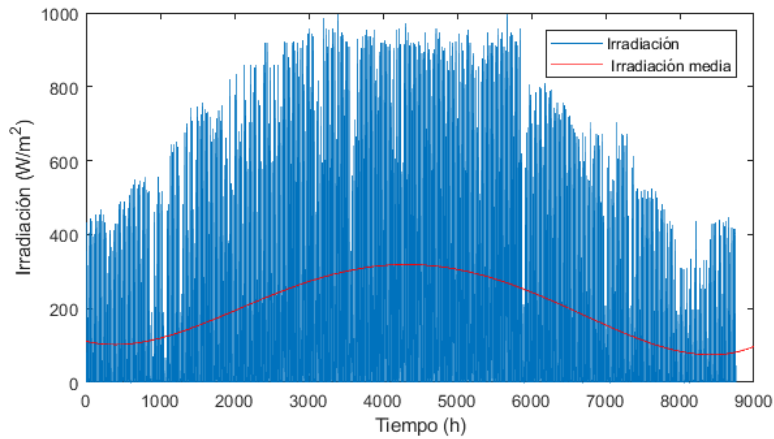


Fig. 2.32. Irradiación solar horaria sobre la superficie horizontal en Madrid durante un año natural.

Como se puede ver en esta gráfica, ver Fig 2.32, durante todo el año se producen días con una irradiación medianamente alta, sin embargo es en verano, la parte central, donde hay una mayor irradiación solar, ya que es cuando los días son más largos. Además, se puede apreciar que la parte central es una zona más densa y alta que los extremos, donde, aunque hay días despejados, éstos duran menos y aparecen con mas regularidad días con baja irradiación.

Entre las dos gráficas, ver Fig. 2.31 y 2.32, podemos encontrar bastante relación, como la distribución media de ambas, que es similar, o que por ejemplo, alrededor de las 3600 horas, se produce un bajón de las temperaturas que coincide con una disminución de la irradiación, que puede ser debido a un periodo de lluvias, propio de la primavera.

Una vez que tenemos los datos de temperatura ambiente e irradiación, como ya comenté anteriormente, puedo calcular la temperatura de la celda mediante la ecuación (2.22), sabiendo que la temperatura nominal de la placa es de 47 ° C [62]. En la Fig. 2.33, aparece representada esta temperatura de celda de manera horaria.

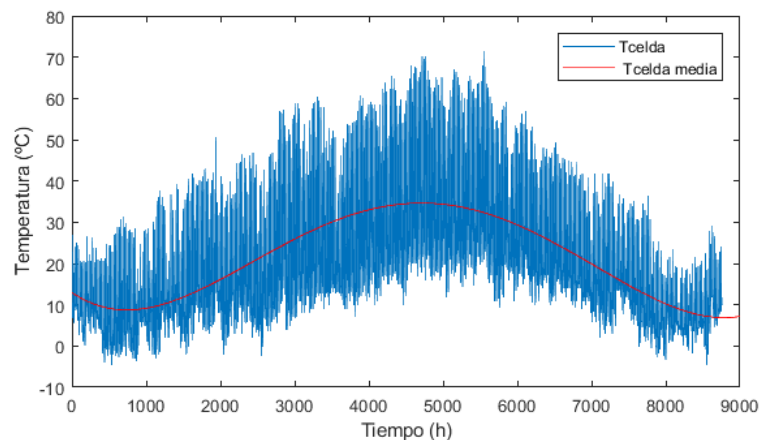


Fig. 2.33. Temperatura horaria de la celda fotovoltaica en Madrid durante un año natural.

Se puede ver, que esta temperatura de celda tiene una forma prácticamente idéntica a la de la temperatura ambiente, pero con una media de unos cinco grados superior al de esta última. Esta temperatura media de celda alcanza unos 20 °C.

Ahora falta utilizar esta temperatura de celda para obtener el rendimiento del módulo horario durante un año natural. Esto lo haremos utilizando la ecuación (2.23), en la que calculé el rendimiento en función de la temperatura de la celda. Los resultados de introducir los datos de esta temperatura en la expresión son los que se muestran en la Fig. 2.34.

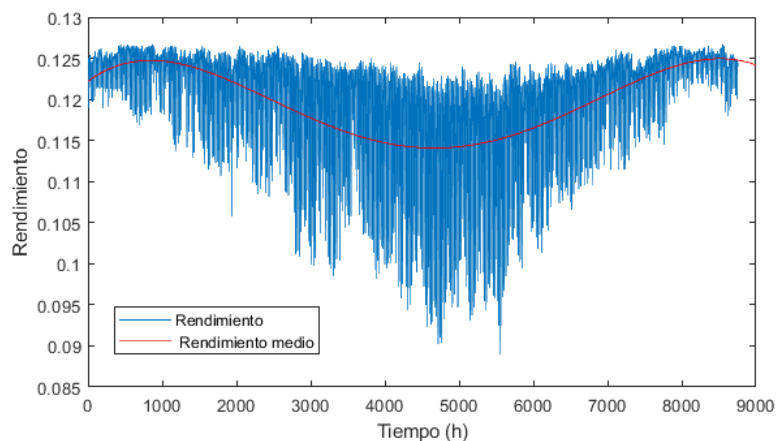


Fig. 2.34. Rendimiento del módulo fotovoltaico por hora en Madrid durante un año natural.

Ya que el rendimiento es inversamente proporcional a la temperatura de la celda, como ya vimos anteriormente con la TABLA 2.5, la curva de rendimiento medio se invierte, pasando a ser máxima donde las temperaturas son mínimas.

El módulo alcanza el 12 % de rendimiento medio, que aunque es bajo para ser una placa solar de silicio monocristalino, comparados con los valores medios que aparecen en el apartado de tipos de celdas fotovoltaicas, puede ser debido a que es una placa algo antigua, del 2006, y los valores típicos aportados en ese apartado son más recientes.

Llegados a este punto, solo falta un paso para obtener la potencia eléctrica que es capaz de suministrar un módulo de este modelo de panel solar. Para conseguir esto, voy a utilizar la ecuación (2.21) y proceder de la misma manera que en el caso anterior, sustituyendo los valores de temperatura de la celda e irradiación sobre la superficie horizontal, dado que los paneles solares los voy a colocar de manera paralela al suelo, sobre el tejado del autobús, en dicha ecuación.

Haciendo ésto, he obtenido los datos de rendimiento horario del módulo durante el periodo anual del que estamos tratando y, para una mejor comprensión, los he reflejado en la gráfica de la Fig. 2.35.

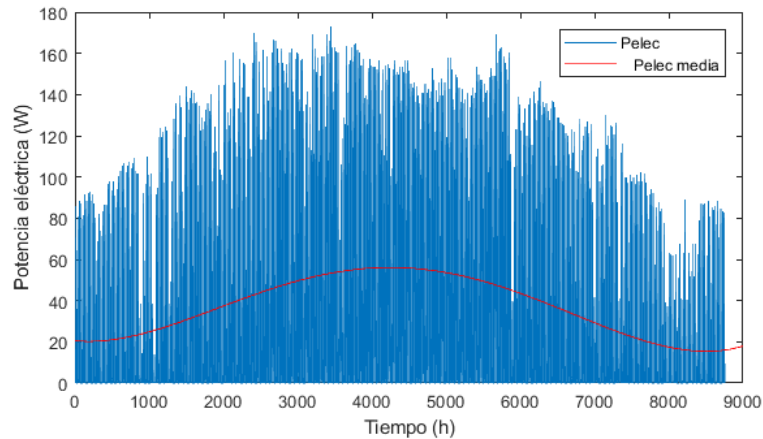


Fig. 2.35. Potencia eléctrica obtenida por placa solar por hora en Madrid durante un año natural.

En esta gráfica, ver Fig. 2.35, se ve como la potencia eléctrica es mayor de media durante las estaciones más cálidas, como inicialmente podíamos preveer, sin embargo, no hay tanta diferencia como en la irradiación durante el invierno, ya que se atenúa debido al mayor rendimiento en este periodo. En ésta, aparece la potencia total que es capaz de suministrar un módulo solar a lo largo de un año, sin embargo, para poder entender la magnitud de estos datos, necesito saber el impacto que tendrían en el consumo, o en la autonomía de estos autobuses. Para hacer esto, y comprender mejor como funciona esta tecnología, voy a analizar el caso en dos días prototípicos, uno donde la potencia eléctrica es alta, y otro en la que es baja, el 16 de Julio y el 8 de Febrero, respectivamente. He elegido éstos porque son dos días que representan el invierno y el verano, las condiciones opuestas, y esto permite un mejor entendimiento del sistema.

Para obtener ésto, voy a aislar de los datos obtenidos los correspondientes a estos días, por lo que, ahora además de apreciarse las diferencias estacionales, se van a ver mejor las diferencias entre el día y la noche. En la Fig. 2.36 muestro la temperatura ambiente del día 16 de Julio en Madrid.

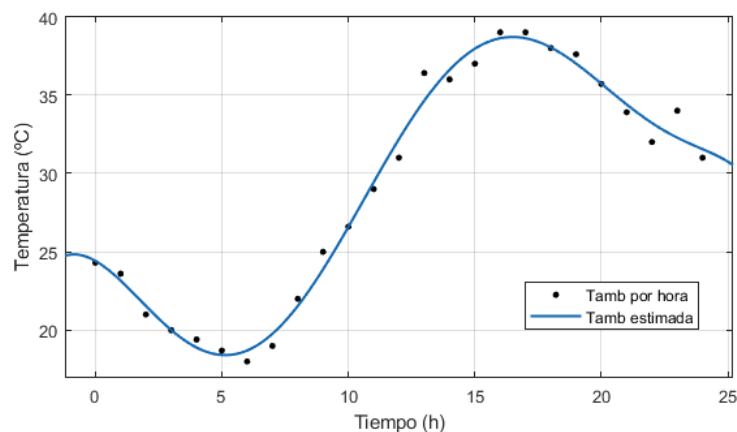


Fig. 2.36. Temperatura ambiente el 16 de Julio en Madrid.

Vemos como éste es un día típico de verano, con unas temperaturas medias durante el día de más de 30 °C y alrededor de 22 °C durante la noche, llegando a los 38 °C de máxima y a los 16 °C de mínima.

Ahora voy a mostrar, ver Fig. 2.37, los mismos datos para el día 8 de Febrero. De tal manera, aparecerán las temperaturas ambiente durante ese día.

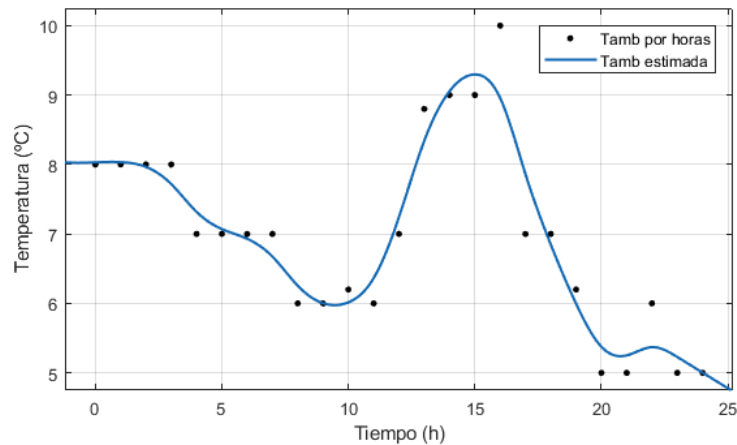


Fig. 2.37. Temperatura ambiente el 8 de Febrero en Madrid.

Este día se corresponde con uno típicamente invernal en Madrid, con temperaturas alrededor de los 8 °C y mínimas de 5 °C. Igual que en verano, y como ocurre en la mayoría de las ocasiones, por la noche la temperatura disminuye respecto al día.

De la misma manera, voy a representar la irradiación durante estos días, para comprender mejor los datos anuales anteriormente mostrados y seguir con el cálculo de estos ejemplos. Voy a empezar mostrando la del día de Julio, ver Fig. 2.38.

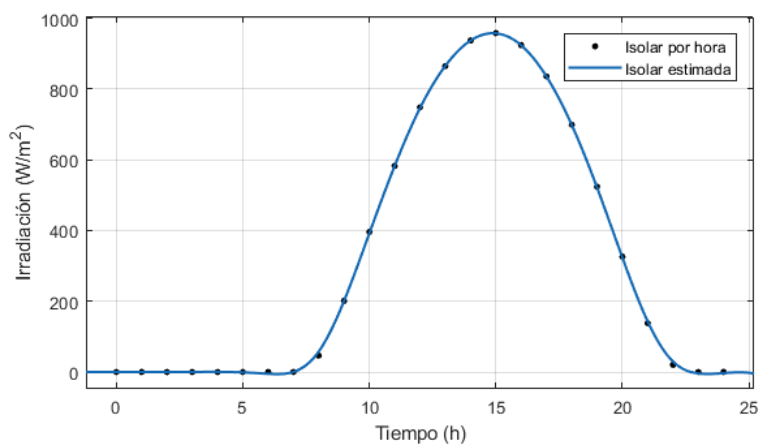


Fig. 2.38. Irradiación solar sobre la superficie horizontal el 16 de Julio en Madrid.

Como se puede apreciar en la gráfica, ver Fig. 2.38, empieza a amanecer alrededor de las siete de la mañana y anochece cerca de las diez de la noche, sin contar cambios de hora,

por lo que en esta época del año tendríamos unas 15 horas de sol, que podemos aprovechar para generar energía en las placas. La irradiación máxima alcanza prácticamente los 1000 W/m^2 y la curva tiene su máximo alrededor del mediodía, cuando el sol está en su punto más alto.

De igual modo, voy a mostrar la irradiación solar en el día elegido de invierno, ver Fig. 2.39.

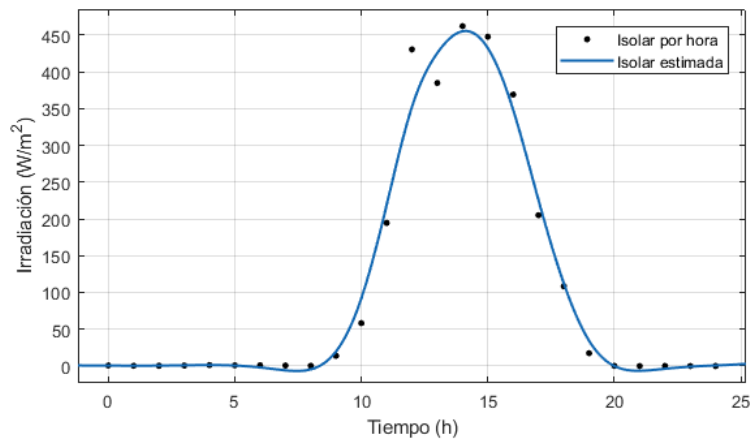


Fig. 2.39. Irradiación solar sobre la superficie horizontal el 8 de Febrero en Madrid.

En este día, ver Fig. 2.39, se observa que amanece más tarde, alrededor de las ocho y media de la mañana, por otra parte, el sol se pone sobre las siete de la tarde, teniendo así unas diez horas de luz solar, por lo que aún en invierno hay muchas horas de luz. Esto hace que Madrid sea una ciudad ideal para implementar esta tecnología. En este día la irradiación es máxima sobre las dos del mediodía y alcanza un valor de 450 W/m^2 , algo menos de la mitad que el día de verano.

Igual que he hecho para los casos anteriores, voy a hacerlo para el de la temperatura de la celda. Ésta aparece representada para el día 16 de Julio en la Fig. 2.40.

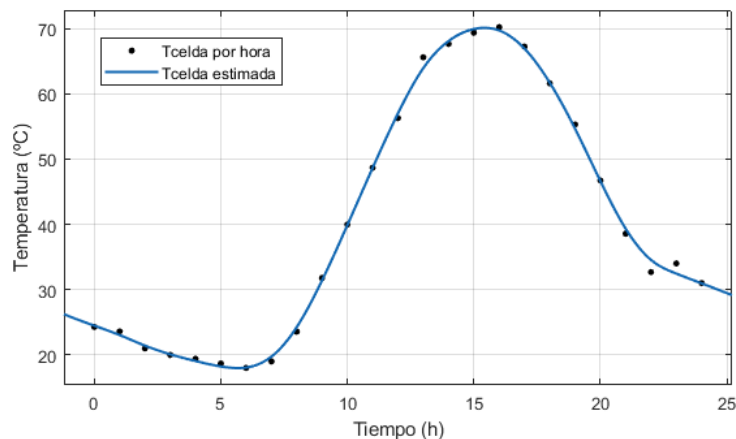


Fig. 2.40. Temperatura de la celda el 16 de Julio en Madrid.

Como no podía ser de otra manera, es una mezcla de las otras gráficas de este día, la de temperatura ambiente y la de irradiación, ya que depende directamente de éstas, como hemos visto en la ecuación (2.22). Pero igual que ocurría con la gráfica anual, la temperatura media es más alta que la ambiente.

En la siguiente figura, ver Fig. 2.41, voy a representar el mismo parámetro que en la anterior, la temperatura de la celda, pero para el día de invierno.

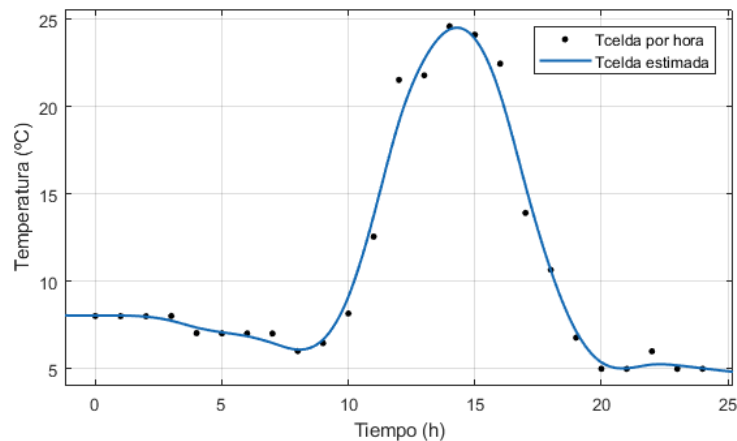


Fig. 2.41. Temperatura de la celda el 8 de Febrero en Madrid.

Tanto en las curvas de temperatura como en las de irradiación coincide siempre que el máximo ocurre alrededor del mediodía, que es cuando el sol se encuentra en el punto más alto de su trayectoria visible desde la Tierra. Esto es porque en ese punto es cuando la luz incide de manera más perpendicular, teniendo que atravesar menos atmósfera.

Conociendo ya los valores de temperatura de la celda, y siguiendo los mismo pasos que en el caso anual, voy a pasar a mostrar los valores de rendimiento energético por hora en los dos días que he seleccionado. El primero, siguiendo el mismo orden hasta ahora, va a ser el rendimiento del día 16 de Julio, ver Fig 2.42.

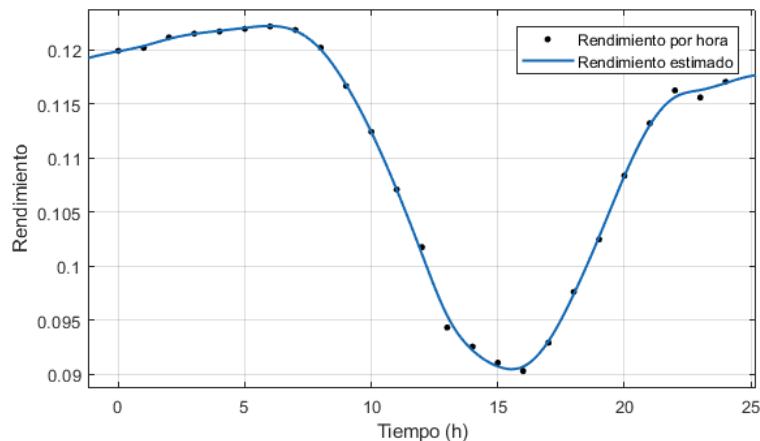


Fig. 2.42. Rendimiento del módulo el 16 de Julio en Madrid.

De la misma forma, en la Fig. 2.43 he representado los valores del rendimiento en el día de invierno, que igual que la del día de verano, su gráfica es de forma inversa a la de la temperatura de la celda.

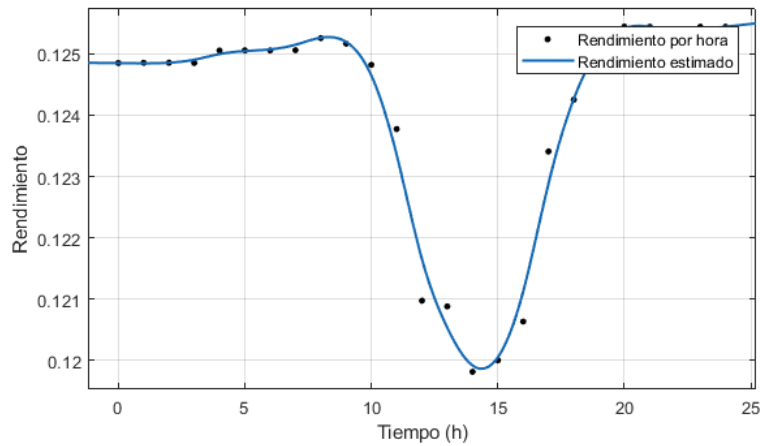


Fig. 2.43. Rendimiento del módulo el 8 de Febrero en Madrid.

Por último, y nuevamente siguiendo el mismo procedimiento que para los casos anteriores, voy a mostrar el valor de la potencia eléctrica en cada uno de estos días. Ésto me permitirá obtener después la energía eléctrica diaria capaz de ser suministrada a las baterías por parte de un módulo fotovoltaico.

En esta gráfica, ver Fig. 2.44, muestro la potencia eléctrica que suministraría un módulo de este tipo en el techo del autobús el 16 de Julio.

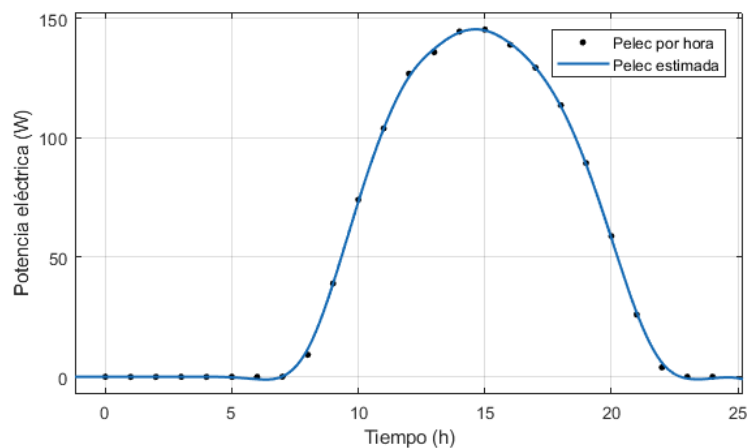


Fig. 2.44. Potencia eléctrica suministrada por el módulo el 16 de Julio en Madrid.

Se ve de manera clara, que tiene una forma muy similar a la gráfica de la temperatura de la celda, sin embargo varía en que cuando no hay luz deja de haber potencia eléctrica, ya que se detiene el efecto fotoeléctrico.

De igual manera, en la siguiente gráfica, ver Fig. 2.45, aparece la potencia eléctrica

que suministraría un módulo de este tipo en el techo del autobús nuestro día prototípico de invierno.

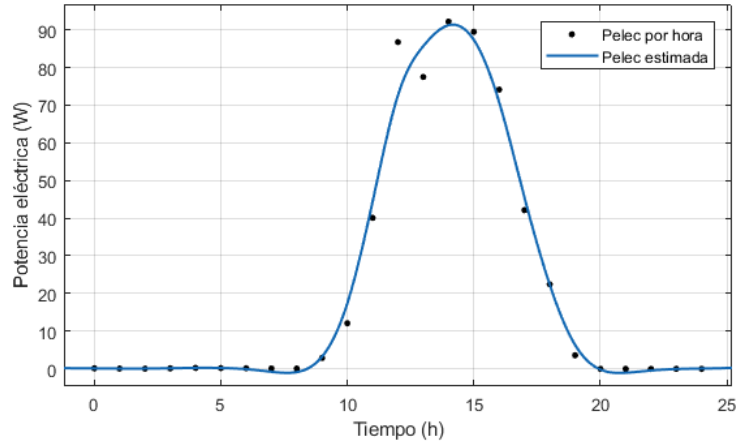


Fig. 2.45. Potencia eléctrica suministrada por el módulo el 8 de Febrero de en Madrid.

En esta gráfica también se aprecia que conserva una forma muy similar a la de la temperatura de la celda, pero con valores nulos cuando no hay irradiación, además, la potencia media obtenida es algo menos de la mitad que la que se consigue en el día de verano.

2.3.5. Análisis de resultados

Una vez que he aislado los valores de potencia eléctrica para estos dos días puedo pasar a calcular cual sería la energía que suministraría este panel en el techo del autobús durante el día completo. Para hacer esto, es necesario realizar la integral bajo la curva de las gráficas de potencia eléctrica tal como se muestra en la ecuación (2.24), donde la energía suministrada a las baterías sería E_{elec} , la potencia eléctrica de ese día en función de la hora del día es $P_{elec\text{día}}$ y dh es el diferencial de hora.

$$E_{elec} = \int_0^{24} P_{elec\text{día}}(h) dh \quad (2.24)$$

Sin embargo, para utilizar esta expresión es necesario calcular la función de la curva, ya que yo solamente cuento con una serie de puntos discretos, y es necesaria una función continua para realizar este cálculo. Por ello, para resolverlo, voy a utilizar un método numérico, a través del programa Matlab, que me permite calcular esta integral con una función continua construida a través de uniones rectas de los puntos contiguos. De esta manera, calcula el área de cada uno de los trapecios que se forman y las suma para obtener el área total.

Por otra parte, el techo del autobús es una superficie mayor que el módulo solar, por lo que es posible montar más de un módulo. Para calcular el número de módulos que caben

en el techo del autobús, voy a dividir la longitud del autobús entre la longitud del módulo, ver ecuación (2.25), y de la misma manera voy a dividir las anchuras, ver ecuación (2.26).

Dispongo los paneles de esta forma, ya que es aquella en la que se maximiza el número de módulos posibles. Aunque lo ideal sería encontrar en el mercado un módulo de dimensiones ajustadas para nuestro caso, con el que seríamos capaces de cubrir el techo.

$$N_{filas} = \frac{7,995 \text{ m}}{1,59 \text{ m}} = 5,03 \simeq 5 \quad (2.25)$$

$$N_{column} = \frac{2,35 \text{ m}}{1,047 \text{ m}} = 2,24 \simeq 2 \quad (2.26)$$

El número máximo de módulos, que es el producto de estas dos relaciones, y resulta un total de diez módulos, lo voy a utilizar para obtener la energía total que suministran el conjunto de paneles solar a las baterías y las implicaciones que esto tiene.

Para ver de una manera más sencilla y esquemática los resultados de la energía que es capaz de suministrar este sistema, voy a presentarlos en la TABLA 2.6. En ella voy a mostrar la energía total para cada uno de los dos días seleccionados, y la energía media diaria total, como resultado de calcular la integral de la energía para todo el año, y hallar su media, para comprobar en que rango de desempeño se encuentran estos días.

TABLA 2.6. ENERGÍA ELÉCTRICA SUMINISTRADA A LO LARGO DEL DÍA POR EL SISTEMA FOTOVOLTAICO ESTUDIADO

	E_{elec} un módulo (kWh)	E_{elec} Total (kWh)
16 de Julio	1,339	13,39
8 de Febrero	0,544	5,44
Media diaria	0,892	8,92
Fuentes: Elaboración propia.		

En la tabla vemos que en el día de verano la energía es mayor que en el de invierno y que en un día promedio. Esta cantidad de energía no es algo despreciable en comparación a la que gasta un autobús a lo largo del día, y para comprobar esto, voy a calcular cuanto afecta en el consumo y en la autonomía del autobús.

Como es lógico, este dispositivo en el autobús de gas natural no puede dar soporte al motor, ya que no es eléctrico, pero puede usarse para sufragar gastos energéticos adicionales que tienen los autobuses, como el aire acondicionado, la apertura automática de puertas, las luces, cámaras internas, tomas de carga para móviles, sistemas de wifi, etc.

Por el contrario, en el autobús eléctrico, además de poder utilizarse para las mismas cuestiones que en el de gas natural, puede configurarse para reducir el consumo del vehículo, suministrando esa energía para su uso en el motor, que es como lo voy a utilizar yo para las estimaciones que calcularé a continuación.

En la TABLA 2.7, muestro la reducción de consumo que supondría la instalación de este sistema en el autobús eléctrico, para los tres días calculados y utilizando como supuestos, que el autobús recorre al día 176 km, la media diaria que recorren los autobuses de la EMT, y que los consumos son los calculados para cada ciclo.

TABLA 2.7. REDUCCIÓN DE LOS CONSUMOS DEL AUTOBÚS ELÉCTRICO EN LOS DIFERENTES CICLOS CON LOS PANELES SOLARES INSTALADOS

	Consumo UDDS	Consumo NYCC	Consumo OC BUS
16 de Julio	130,79 (-5,51 %)	81,99(-8,55 %)	84,97(-8,27 %)
8 de Febrero	134,98 (-2,24 %)	86,01 (-3,47 %)	89,01 (-3,36 %)
Media diaria	133,11 (-3,67 %)	84,20 (-5,69 %)	87,20 (-5,51 %)
Todos los datos, sin contar porcentajes, están en kWh/100km			
Fuentes: Elaboración propia.			

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos en la TABLA 2.7, no son mejoras despreciables, ya que de media supone una reducción del cinco por ciento del consumo, llegando a más del ocho por ciento en días soleados de verano.

Aunque es cierto que en estos cálculos no tengo en cuenta el factor de sombreado, que pueden producir los edificios o los árboles, generalmente éste será un efecto moderado ya que se ve minimizado por un sistema de diodos de bypass. Además, en Madrid las calles son anchas y la altura de los edificios media, con multitud de zonas diáfanas. Aún así si le añadiésemos el factor de sombreado seguiría sin ser despreciable la mejora obtenida.

Desde el punto de vista de la autonomía, ésta se vería incrementada en el mismo porcentaje que el consumo se ve reducido. Por lo que estamos influyen así en varios aspectos del desempeño general del autobús.

De la misma manera que utilicé en el apartado de estimación de costes, voy a calcular el ahorro que supondría este sistema tomando como referencia el consumo en un día medio para el ciclo OC BUS, que como ya he dicho, es el más representativo. Sabiendo que cada módulo fotovoltaico tiene un precio al consumidor de 3,18 € [63] y añadiendo el coste total de la instalación, que para los diez módulos ascendería a 2.400 €, tomando que el coste medio de instalación en España es de 1,2 € por vatio y módulo [64].

$$\begin{aligned}
 & - 2431,8 \text{ €} + (0,14122 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} (0,92 - 0,872) \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \dots \\
 & \dots 64240 \text{ km}) \sum_{i=1}^{14} \frac{1}{(1,0196)^i} = 2855,10 \text{ €} \quad (2.27)
 \end{aligned}$$

Como se puede observar en la ecuación (2.27), es una operación rentable durante la vida útil del autobús, suponiendo un ahorro de 2.855,10 €. Además, he calculado que

una vez cumplidos seis años el sistema empieza a ser rentable. Por lo que la propuesta es viable tanto energética como económicamente. Además, el esfuerzo de inversión inicial que requiere esta propuesta es muy pequeño, el 0,76 % del valor total del vehículo.

Este ahorro supone también una pequeña disminución de los contaminantes asociados debidos a la producción de electricidad, ya que al producir la electricidad directamente donde se consume, se evitan las pérdidas del transporte eléctrico. También se reducen los contaminantes, ya que esta energía eléctrica es generada por paneles solares, que son una energía renovable que no producen contaminantes durante su uso.

Por otra parte, al usarse en el autobús de CNG, como la energía que generan los paneles suple el gasto extra que tienen que hacer los motores cuando está encendido el aire acondicionado u otros elementos, repercute positivamente en el consumo, aunque en menor medida que en el eléctrico. Por ello, también se reducirían las emisiones directas de contaminantes, haciendo este autobús más viable.

Por lo que esta propuesta es, según lo expuesto anteriormente, un buen método para mejorar la eficiencia energética, y reducir el impacto medioambiental que producen los autobuses.

3. CONCLUSIÓN

A lo largo de este trabajo he obtenido una serie de resultados, dirigidos a la obtención de los objetivos propuestos inicialmente, que he ido exponiendo y analizando, sin embargo, es necesario tomar todos estos resultados y análisis y ponerlos en conjunto, para así poder entender las ideas generales que están plasmadas en éstos y por consiguiente en el trabajo.

En el primer análisis que aparece en el trabajo muestro la relevancia que tienen los automóviles en la sociedad, pero no solo esto, también muestro los efectos que éstos producen en ésta. Además, destaco la importancia que supondría el cambio de los medios convencionales de propulsión en el transporte terrestre por los combustibles alternativos que he elegido para este trabajo, intentando responder al objetivo de exponer las consecuencias medioambientales por su uso.

Las consecuencias que conlleva este cambio son grandes. Estos vehículos nos permiten reducir el impacto que estamos dejando sobre el planeta en el que vivimos, actuando así de una manera más responsable con respecto a aquello de lo que dependemos. Esta repercusión no solo es un problema a largo plazo, que debido a la coyuntura de cada momento es a veces relegado a un segundo plano, aunque no debiera, sino que afecta directamente y de manera severa a las personas que viven en el periodo en el que se produce. La cantidad de contaminantes que emiten los vehículos diariamente hace que la esperanza de vida se reduzca y que la calidad de vida se deteriore.

El uso de los autobuses de gas natural y los eléctricos supone una reducción de estos problemas en buena medida, y por tanto, solamente por este motivo ya merece la pena cambiar hacia estas tecnologías. Pero éste no es uno de los principales objetivos de este trabajo, como sí lo es el que trata de determinar las diferencias entre ambas para poder ubicarnos y determinar el recorrido que pueden tener las mismas.

Por eso, el siguiente análisis que hago es el cálculo del consumo, y los resultados muestran que el autobús eléctrico consume alrededor de seis veces menos energía que el de gas natural. Lo que esto nos expone, es que aunque hoy en día hay más autobuses de gas natural, esto es algo transitorio. Ya que, ventajas como no emitir directamente y un consumo de energía mucho menor harán que la tendencia sea cada vez mayor hacia el vehículo eléctrico. Además, y debido principalmente a este bajo consumo, el vehículo eléctrico es más rentable que el de gas natural durante su ciclo de vida, como he calculado durante el desarrollo del trabajo, consiguiendo contestar así otro de los objetivos de este proyecto.

Este cambio paulatino va a requerir un esfuerzo, tanto desde el punto de vista de la investigación como del de las infraestructuras. Los autobuses eléctricos se encuentran en una fase de desarrollo temprana, lo que genera una serie de inconvenientes, que les restan

competitividad y los hacen menos atractivos, tales como que la inversión inicial necesaria es alta, que tienen poca autonomía o la corta durabilidad de las baterías. Estos problemas se han ido mejorando desde los primeros vehículos, esto hace que estén cerca de llegar al punto de equipararse con las prestaciones de un autobús convencional. Pero éste, como ya he dicho, no es el único esfuerzo que hay que hacer para que se produzca el cambio. Es necesario también, aumentar la producción de electricidad y los lugares de repostaje existentes. Es imprescindible que este aumento de la producción se haga basándose en formas de generación de energía eléctrica lo más limpias posibles, ya que si no fuese así, estaríamos perdiendo la ventaja fundamental que tiene esta tecnología.

El último análisis que muestra este documento, que es el contesta al objetivo de proponer un sistema de mejora energética para los autobuses, expone que hoy en día existe una forma, con grandes ventajas, de mejorar un estos automóviles. La inclusión de paneles solares en el techo del vehículo es capaz de mejorar las prestaciones de cualquier autobús, pero en este trabajo se muestra la incidencia que tendría especialmente en el autobús eléctrico, que es más positiva. No solo se muestra como una opción efectiva, desde el punto de vista de la eficiencia energética, sino que lo presento como un proyecto rentable y beneficioso para el medio ambiente.

Llegado al final del trabajo, creo que se han alcanzado los objetivos propuestos en el mismo, demostrando de manera clara que hay formas de mejorar nuestro presente y sobre todo nuestro futuro, que era la motivación principal para hacer este proyecto, contribuyendo en la medida de mis posibilidades a conseguirlo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ‘Los Transportes y las Infraestructuras. Informe anual 2016’, Ministerio de Fomento, inf. téc., 2017.
- [2] ‘La energía en España 2016’, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, inf. téc., 2017.
- [3] EMT. (2017). Nuestra Flota, [En línea]. Disponible en: <http://www.emtmadrid.es/Empresa/Somos/NuestraFlota>.
- [4] M. R. D. Ortiz. (2018). Global annual sales of light-duty plug-in electric vehicles in the world’s top markets between 2011 and 2017, [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_plug-in_car_sales_since_2011.png.
- [5] G. C. C. NASA. (2018). Evidence. Climate change: How do we know?, [En línea]. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/evidence/>.
- [6] ‘Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad’, IPCC, inf. téc., 2014.
- [7] NOAA. (2018). The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI), [En línea]. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [8] M. de Industria Comercio y Turismo. (2018). Emisiones de gases de efecto invernadero por actividad, [En línea]. Disponible en: http://www.mincotur.gob.es/es-ES/IndicadoresyEstadisticas/DatosEstadisticos/IV.%20Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/IV_14.pdf.
- [9] ‘Improving Europe’s air quality measures reported by countries’, EEA, European Environment Agency, inf. téc., 2018.
- [10] ‘Evaluación de la calidad del aire en España 2016’, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, inf. téc., 2017.
- [11] OMS. (2018). Los efectos sobre la salud, [En línea]. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/.
- [12] I. M. Sanz, ‘El Gas Natural Vehicular frente a los combustibles tradicionales: comparativa de emisiones de Gases de Efecto Invernadero de su ciclo de vida en España’, Grupo Gas Natural-Unión Fenosa, inf. téc., 2014.
- [13] ‘Nota informativa sobre la metodología de estimación del mix eléctrico por parte de la Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC)’, Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC), inf. téc., 2018.

- [14] B. Mundial. (2018). Transmisión de energía eléctrica y pérdidas en la distribución, [En línea]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.LOSS.ZS>.
- [15] J. de la Morena Cancela, 'La eficiencia energética en motores eléctricos. Normativa IEC 60034-30', Ministerio de Energía, Industria y Turismo, inf. téc., 2012.
- [16] M. del Interior. (2016). La DGT clasifica el parque de vehículos en función de su potencial contaminante, [En línea]. Disponible en: <http://www.dgt.es/es/prensa/notas-de-prensa/2016/20160414-dgt-clasifica-parque-vehiculos-funcion-potencial-contaminante.shtml>.
- [17] O. J. of the European Union, *Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council*, jun. de 2007.
- [18] OMS. (2018). Calidad del aire y salud. Datos y cifras., [En línea]. Disponible en: [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [19] M. de Agricultura Pesca y Alimentación. (2018). Monóxido de carbono, [En línea]. Disponible en: <https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/monoxido-carbono.aspx>.
- [20] P. Francisco Posada, 'CNG Bus Emissions Roadmap: from Euro III to Euro VI', ICCT, The International Council on Clean Transportation, inf. téc., 2009.
- [21] 'Impactos ambientales de la producción de electricidad. Estudio comparativo de ocho tecnologías de generación eléctrica', Ministerio de Ciencia y Tecnología, inf. téc., 2014.
- [22] R. A. E. de la Lengua. (2018). Definición de autobús, [En línea]. Disponible en: <http://dle.rae.es/srv/fetch?id=4RA0JzM>.
- [23] W. Oswald, *Camiones y autobuses Mercedes-Benz 1886-1986*. Motorbuch Verlag, Stuttgart, 2008.
- [24] S. Zeitung. (2007). Primer autobús de gasolina del mundo, [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erste_Benzin-Omnibus_der_Welt.jpg.
- [25] H. M. M. Truck. (2018). 1900-1909, [En línea]. Disponible en: <https://www.macktrucks.com/about-mack/museum/mack-history/1900-1909/>.
- [26] M. de Transportes Urbanos de Francia. (2018). Le Place Pigalle - Halle aux Vins (ligne I) se dirige vers la rue du Louvre dans une circulation encore très hétéroclite., [En línea]. Disponible en: http://www.amtuir.org/06_htu_bus_100_ans/oa_1905_1913/images/1907_rivoli_p2.htm.
- [27] ———, (2018). Una TN6A de la línea 125, equipada con un gasificador, está esperando la hora de salida en Porte d'Orléans., [En línea]. Disponible en: http://www.amtuir.org/06_htu_bus_100_ans/oa_1940_1950/oa_1940_1950.htm.

- [28] M.-G. Josef Rubel. (2005). En lo alto del carruaje amarillo por Renania, [En línea]. Disponible en: <http://www.wisoveg.de/bve/jrubel/seite40.html>.
- [29] C. de amigos del transporte público de Madrid. (2018). Historia del transporte en Madrid, [En línea]. Disponible en: <http://clubdeamigos.crtm.es/para-ti-m/info-util/historia-del-transporte-en-madrid.html>.
- [30] F. Aparicio Izquierdo, *Teoría de los vehículos automóviles*, spa. Madrid: : Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 1995.
- [31] ‘Análisis de los riesgos asociados a la circulación de vehículos alimentados por gas natural comprimido en espacios públicos subterráneos, y de la normativa y estudios relacionados.’, Centro Tecnológico Aitemin, inf. téc., 2012.
- [32] C. World. (2018). CNG tanks: Pressure vessel epicenter, [En línea]. Disponible en: <https://www.compositesworld.com/articles/cng-tanks-pressure-vessel-epicenter>.
- [33] U. de Sevilla. Departamento de Física Aplicada III. (2015). Ciclo Otto, [En línea]. Disponible en: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Otto.
- [34] M. Benz. (2018). Bus Classic M906 LAG, [En línea]. Disponible en: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/vehicles/aggregates/powertrain-bus-classic-engines/>.
- [35] J. P. Chiu, J. Wegrzyn y K. E. Murphy, ‘Low Emissions Class 8 Heavy-Duty On-Highway Natural Gas and Gasoline Engine’, en *SAE Technical Paper*, SAE International, oct. de 2004. doi: 10.4271/2004-01-2982. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4271/2004-01-2982>.
- [36] WEH. (2018). WEH® Fueling Nozzle TK26 CNG for fast filling of buses and trucks (NGV2), [En línea]. Disponible en: <https://www.weh.us/weh-fueling-nozzle-tk26-cng-for-fast-filling-of-buses-and-trucks-ngv2-series.html>.
- [37] GASNAM. (2018). Estaciones de gas natural vehicular en España y Portugal, [En línea]. Disponible en: <http://gasnam.es/estaciones-gas-natural-vehicular/>.
- [38] Ibañez. (2018). Esto será lo próximo en baterías para coches eléctricos: más de 650 km de autonomía real, [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/automovil/esto-sera-lo-proximo-en-baterias-para-coches-electricos-mas-de-650-km-de-autonomia-real>.
- [39] R. Boronat, M. G. Vallés y S. de Técnicos de Automoción, *El vehículo eléctrico : desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocios*, spa. Barcelona: Libbooks, 2011.

- [40] M. A. de la Peña Gochi. (2016). Tesis: Análisis energético de un sistema recuperador de energía cinética (KERS), [En línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/docs111/tesis-analisis-energetico-sistema-recuperador-energia-cinetica-kers/tesis-analisis-energetico-sistema-recuperador-energia-cinetica-kers2.shtml>.
- [41] Endesa. (2016). Carga ultrarápida para autobuses eléctricos en Barcelona., [En línea]. Disponible en: <http://www.ecomotion.es/require/archivos/articulos/descarga/ifMRpjFEXohJeE0c9uCpKnBJ.pdf>.
- [42] ABB. (2017). Electric buses. Solutions portfolio, [En línea]. Disponible en: https://library.e.abb.com/public/d993026ff54e411eb488348c6336cfbb/ABB_Complete-offer-ebus_FINAL_X5.pdf.
- [43] BusToCoach. (2015). Bredamenarinibus VIVACITY + C CNG, 8 Metros, Urban Class I, 2 puertas, [En línea]. Disponible en: <http://www.bustocoach.com/it/content/bredamenarinibus-vivacity-c-cng-8-metri-urbano-classe-i-2-porte>.
- [44] Irizar. (2018). Irizar i4 Híbrido, [En línea]. Disponible en: <http://www.irizar.com/autobuses-y-autocares/autocares/irizar-i4-hibrido/>.
- [45] NREL. (2015). FASTSim: Future Automotive Systems Technology Simulator, [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/transportation/fastsim.html>.
- [46] J. A. López. (2013). Dinámica longitudinal tracción. Resistencia al avance y diagrama de tracción, [En línea]. Disponible en: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/455/42635/1/Documento6.pdf.
- [47] J. V. Paúl y J. I. R. García, *Sistemas de transmisión y frenado*. Macmillan Education, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.macmillan.es/catalogo/formacion_profesional/castellano/fp_grado_medio/vehiculos/sistemas_transmision/presentacion.html.
- [48] DieselNet. (2002). Emission Test Cycles. Orange County Bus (OC BUS) Cycle., [En línea]. Disponible en: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ocbus.php>.
- [49] —, (2000). Emission Test Cycles. EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) for Heavy-Duty Vehicles., [En línea]. Disponible en: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/udds.php>.
- [50] —, (2000). Emission Test Cycles. EPA New York City Cycle (NYCC)., [En línea]. Disponible en: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/nycc.php>.
- [51] E. Kountz. (2016). Understanding MPG and MPGe, [En línea]. Disponible en: <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/kountz2/>.
- [52] ‘Informe de gestión.’, EMT, inf. téc., 2016.

- [53] ‘EMT Madrid compra 200 autobuses de gas e híbridos’, *Viajeros.*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaviajeros.com/noticia/9861/emt-madrid-compra-200-autobuses-de-gas-e-hibridos>.
- [54] ‘Una línea con 10 minibuses eléctricos recorrerá las calles del barrio Lavapiés’, *20 minutos*, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.20minutos.es/noticia/348433/0/lavapies/autobuses/electricos/>.
- [55] ‘El Ayuntamiento de Badajoz sopesa comprar un autobús eléctrico’, *HOY*, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.hoy.es/badajoz/ayuntamiento-sopesa-comprar-20171115002022-ntvo.html>.
- [56] (2018). Precio del Gas Natural Comprimido (GNC) en estaciones de servicio a partir de agosto de 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.glpautogas.info/precio-gas-natural-comprimido.html>.
- [57] (2018). El precio de la electricidad en el mercado regulado, [En línea]. Disponible en: <https://www.endesaclientes.com/precio-luz-pvpc.html?d=Any>.
- [58] (2018). Inflacion de España en 2017, [En línea]. Disponible en: <https://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/espana/inflacion-historica/ipc-inflacion-espana-2017.aspx>.
- [59] J. A. Roca, ‘Los 10 principales fabricantes de paneles fotovoltaicos del mundo en 2017’, *El Periodico de la Energía*, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/los-10-principales-fabricantes-de-paneles-fotovoltaicos-del-mundo-en-2017/>.
- [60] (2014). Electric Bus – Green Transport for everybody!, [En línea]. Disponible en: <https://plugincaroo.wordpress.com/tag/bus-roof-top-solar-panel/>.
- [61] D. T. de SunFields Europe. (2018). Tipos de células fotovoltaicas y su estructura, [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/celula-fotovoltaica-tipos-y-estructura/>.
- [62] Isofotón. (2006). Módulo fotovoltaico IS-200/32., [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8398/M%C3%B2dul%20Fotovoltaic%20ISOFOTON-200_32.pdf?sequence=23&isAllowed=y.
- [63] P. S. Bologna. (2018). Isofoton 200-220/32, [En línea]. Disponible en: <http://www.pannellisolaribologna.it/isofoton/pannelli-fv/moduli-fotovoltaici/isofoton-200-220-32/vedi-flypage-dettagliata-del-prodotto.html>.
- [64] SotySolar. (2017). Precio instalación placas solares, [En línea]. Disponible en: <https://sotysolar.es/placas-solares/instalacion/precio>.